This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.

+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.

+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.

+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

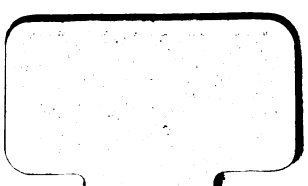
GODFREY LOWELL CABOT SCIENCE LIBRARY
of the Harvard College Library

This book is
FRAGILE
and circulates only with permission.
Please handle with care
and consult a staff member
before photocopying.

Thanks for your help in preserving
Harvard's library collections.

Digitized by Google

Eng
4068
88



Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

à Monsieur H. Hippolyte Fontaine

hommage de son tout dévoué

Paris, 29 Juin 1887

Emile Reynier

Digitized by Google

Droits de traduction et de reproduction réservés.

Digitized by Google

Digitized by Google

GASTON PLANTÉ

Imp Ch Delatre

Photogravure V Monnel

Digitized by Google

TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE

DE

L'ACCUMULATEUR VOLTAÏQUE

Digitized by Google

OUVRAGES DU MÊME AUTEUR

Piles Électriques et Accumulateurs, *Recherches Techniques.* — Un volume in-8° raisin, avec 51 figures dans le texte. — Paris, 1884.

La Traction Électrique par Accumulateurs. — Une plaquette grand in-8°, avec figures. — Paris, octobre 1883.

Les Accumulateurs Électriques étudiés au point de vue Industriel. — Une brochure grand in-8°, avec 24 figures. — Paris, 1885. — (Ce dernier ouvrage est épuisé, il ne sera pas réimprimé.)

Digitized by Google

TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE

DE

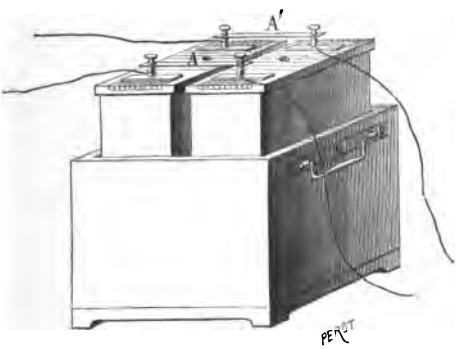
L'ACCUMULATEUR VOLTAÏQUE

PAR

ÉMILE REYNIER

AVEC 62 FIGURES DANS LE TEXTE

ET UN PORTRAIT DE M. GASTON PLANTÉ



PARIS

LIBRAIRIE POLYTECHNIQUE BAUDRY & Cie, ÉDITEURS

15, RUE DES SAINTS-PÈRES, 15

MAISON A LIÉGE, RUE LAMBERT-LEBÉGUE, 19

Juillet 1888

TOUS DROITS RÉSERVÉS

Digitized by Google

Eng 4068.88

HARVARD COLLEGE
FEB 7 1921
LIBRARY

Degrand fund

CHARLEVILLE

TYPOGRAPHIE & LITHOGRAPHIE DE F. DEVIN & Cie

29, RUE DE L'ARQUEBUSE, 29

Digitized by Google

PRÉFACE

Ce *Traité* expose, dans un ordre didactique, l'ensemble des acquisitions scientifiques et pratiques faites depuis Planté jusqu'à nos jours, dans le domaine de l'*Accumulateur Voltaïque*. Il réunit, résume, explique et classe les notions, les théories et inventions relatives aux *Courants Secondaires;* il passe en revue leurs principales *Applications*.

C'est un ouvrage *élémentaire*, ayant un *commencement* accessible, un développement descriptif assez étendu, une technologie facile et un complément pratique.

La *Première Partie* traite des Principes ; elle comprend deux chapitres : l'un consacré aux *Définitions*, qu'on a faites aussi claires que possible ; l'autre aux *Voltamètres*, ou couples secondaires primitifs. Ce deuxième chapitre finit par une *Classification des Accumulateurs*, dont les différentes *espèces* sont réparties en quatre *genres*.

Les genres sont d'importance très inégale au point de vue pratique; mais tel d'entre eux, d'un usage aujourd'hui restreint, est appelé à prendre une place importante dans

Digitized by Google

l'industrie. Il faut donc étudier tous les genres avec un soin pareil. D'ailleurs, l'examen de systèmes voltamétriques divers, même inusités, généralise, élargit le sujet, ouvre l'esprit à des vues d'ensemble qui se dérobent aux électriciens confinés dans l'étude du genre actuellement prépondérant.

La *Deuxième Partie* est consacrée à la DESCRIPTION DES ACCUMULATEURS connus, de ceux qui ont de l'intérêt et de l'originalité. Dans cette partie de l'ouvrage, plus encore que dans les autres, j'ai eu à détruire des erreurs d'attribution qui se propagent au détriment des travailleurs méritants. Les restitutions et les éliminations qu'il a fallu faire ont eu pour résultat de rendre ma nomenclature différente de celles admises naguère. Je dois m'expliquer sur ce point.

Jusqu'en 1880, l'historique des Courants Secondaires ne soulève aucune difficulté : l'ouvrage magistral de Gaston Planté contient tout le sujet et toute son histoire.

En 1881, l'importance industrielle des Accumulateurs, depuis longtemps aperçue par les esprits clairvoyants, devient évidente pour tout le monde. Le succès inattendu de l'invention Faure excite des espérances, de l'émulation... des appétits. Les innovations, les perfectionnements et les plagiats surgissent en foule. Les systèmes, en apparence très nombreux, se répètent avec des noms divers. D'où une confusion que certains ont su exploiter. A la faveur du désordre, des travaux théoriques et pratiques plus ou moins importants ont été démarqués.

Digitized by Google

Dans l'intérêt supérieur de la vérité, j'ai fait un tri des inventions et des plagiats, en prenant soin d'omettre ces derniers.

Des rectifications historiques ne vont pas sans preuves. Les œuvres théoriques, les inventions signalées dans l'ouvrage, portent, autant que possible, une indication d'origine : publication périodique, livre, brevet, etc. Ceci me donnera le droit de réclamer des citations équivalentes à mes contradicteurs.

Le lecteur attentif reconnaîtra mon impartialité. S'il cherche dans le livre un système connu, il le trouvera, à la condition de le chercher *sous la désignation qui lui convient* (1).

La *Troisième Partie* (Technologie) contient les *formules* et les *données numériques* nécessaires pour les calculs que comporte l'utilisation des Courants Secondaires.

Les Applications des Accumulateurs, traitées dans la *Quatrième Partie*, pourraient fournir la matière de plusieurs volumes; il a fallu se borner. On a, pour chaque Application, donné les notions essentielles, sans entrer dans le détail des dispositifs mécaniques spéciaux; on a indiqué, dans les cas principaux, les *transformations* successives de

(1) On n'émet pas ici une prétention à l'infaillibilité. Certaines inventions réelles, qui n'ont pas été publiées en France, peuvent avoir été involontairement omises. L'auteur fera bon accueil aux rectifications et aux réclamations appuyées de documents.

Digitized by Google

l'Énergie et les *coefficients* relatifs à chacune d'elles. Le produit de ces coefficients est le *rendement pratique* des batteries secondaires dans le cas considéré.

Ces Applications, à peine commençantes, montrent déjà l'importance que l'*Accumulation Voltaïque* doit prendre bientôt dans l'industrie. Pas plus ici que dans mes précédents ouvrages, le sujet n'a été grossi. — Comment pourrait-on exagérer la portée de cet art nouveau, qui met aux mains de l'homme toutes les forces de la nature!

Paris, 16 juin 1888.

ÉMILE REYNIER.

Digitized by Google

TABLE DES MATIÈRES

Portrait de M. Gaston PLANTÉ *Frontispice.*

Pages.

Préface 7
Table des matières 11
Table des figures 15

PREMIÈRE PARTIE

PRINCIPES

CHAPITRE PREMIER

DÉFINITIONS

Voltamètre à fils métalliques 19
Force électromotrice secondaire; courant secondaire 20
Polarités secondaires 21
Accumulateurs voltaïques ou piles secondaires 22
Voltamètres divers 23

CHAPITRE II

LES VOLTAMÈTRES

Voltamètre platine—acide sulfurique dilué 25
Voltamètre plomb—acide sulfurique dilué 28
Voltamètre plomb—solution de sulfate de cuivre 32
Voltamètre plomb—solution de sulfate de zinc 34
Voltamètres à charbons 37
Voltamètres cuivre—zincate alcalin 39
Voltamètres à amalgames alcalins 39
Les voltamètres exploitables 40
Classification des accumulateurs 41

Digitized by Google

DEUXIÈME PARTIE

LES ACCUMULATEURS VOLTAÏQUES

CHAPITRE III

LES ACCUMULATEURS PLANTÉ

Pages.
Premières piles secondaire de Planté 45
Piles secondaires à lames parallèles 47
Accumulateurs en spirale 49
Actions chimiques produites dans les couples secondaires de Planté 51
Formation 54
Formation accélérée 54
Capacité voltaïque 55
Constantes 56
Formation autogène ; formation hétérogène 57

CHAPITRE IV

ACCUMULATEURS GENRE PLANTÉ

A FORMATION AUTOGÈNE

Accumulateurs formés en surface 59
Accumulateurs à lamelles très minces 60
Accumulateurs Tommasi 60
Accumulateurs de Kabath 61
Accumulateurs à fils de plomb 62
Accumulateur Simmen 63
Accumulateurs Simmen et Reynier 64
Accumulateurs à grenailles de plomb 67
Accumulateurs à électrodes plissées 68
Le foisonnement de formation 71
Le foisonnement de décharge 72
Foisonnement brut 74
Formation autogène rapide, comprimée par le foisonnement 75
Accumulateurs Reynier 75
Electrodes rendues perméables par l'élimination d'un métal auxiliaire 81
Accumulateur Denis Monnier 82
Accumulateurs à électrodes sulfurées 85

CHAPITRE V

ACCUMULATEURS GENRE PLANTÉ

A FORMATION HÉTÉROGÈNE

Accumulateurs à oxydes ou sels insolubles de plomb juxtaposés à des supports conducteurs, *système Camille Faure* 87
Accumulateurs à plaques alvéolées, remplies de plomb très divisé, *système Volckmar* 91

Digitized by Google

Pages.
Accumulateurs à exydes encastrées, système *Faure-Volckmar*.... 92
Grillages en alliage de plomb et d'antimoine *de M. Sellon*..... 95
Accumulateurs Faure-Sellon-Volckmar..... 95
Modifications diverses aux accumulateurs Faure-Sellon-Volckmar.. 103
Plaques doubles..... 103
Modification dans la composition du liquide, par M. Charles Philippart..... 105
Montage en colonne de M. Gustave Philippart..... 106
Accumulateur mixte, système Faure-Reynier..... 108
Amalgames juxtaposés : accumulateurs Nézeraux..... 110
Plaques en oxydes de plomb agglomérés..... 112
Métallodiums et métallodions de M. Aron..... 113
Électrodes en peroxyde de plomb de M. Tribe..... 113
Électrodes agglomérées de M. Frankland..... 113
Accumulateurs à plaques agglomérées de M. René Tamine..... 114
Lithanode de M. Fitz-Gérald..... 115
Formation électrochimique..... 116
Accumulateurs de Montaud..... 118

CHAPITRE VI

ACCUMULATEURS DIVERS

Accumulateurs plomb — cuivre..... 124
Accumulateurs plomb — zinc..... 127
Accumulateurs d'Arsonval et Carpentier..... 128
Accumulateurs Reynier..... 129
Accumulateurs Bailly..... 136
Liquide de M. Tamine..... 136
Accumulateurs aux zincates alcalins; Piles régénérables de MM. de Lalande et Chaperon..... 137
Accumulateurs Commelin-Desmazures-Bailhache..... 140

TROISIÈME PARTIE

TECHNOLOGIE

CHAPITRE VII

GÉNÉRALITÉS TECHNIQUES

SUR LES ACCUMULATEURS

Constantes..... 154
Forces électromotrices..... 154
Résistance..... 155
Puissance..... 156

Digitized by Google

Pages.
Capacités voltaïques..... 157
Capacité voltaïque utile ou normale..... 158
Travail..... 159
Diagrammes de décharge..... 160
Régimes de charge et de décharge..... 161
Conservation de la charge..... 162
Rendements..... 163
Rendement propre maximum..... 163
Rendement propre normal..... 167
Rendements pratiques..... 167
Poids rapportés à la Puissance et au Travail..... 168
Durée des accumulateurs..... 169
Amortissement..... 170
Formule de mérite d'un système d'accumulateur..... 171

QUATRIÈME PARTIE

APPLICATIONS

CHAPITRE VIII

APPLICATIONS DES ACCUMULATEURS

Observations générales sur la charge des accumulateurs..... 175
Premières applications des couples secondaires, par M. Gaston Planté..... 177
Applications aux recherches scientifiques..... 178
Applications à la télégraphie, à la téléphonie, à l'horlogerie, etc... 180
Application à l'Eclairage Electrique..... 181
Application à la régularisation du courant des machines; Voltmètres Régulateurs..... 184
Soudure des métaux..... 189
Production de la force motrice..... 194
Locomotion électrique sur tramways..... 198
Locomotion électrique sur routes..... 204
Navigation électrique..... 205
Application future des accumulateurs à la Navigation Aérienne.... 211
Transmission et distribution de l'Energie par les courants secondaires..... 213
Translation ou déplacement de l'Enérgie par les accumulateurs... 214
Roulage de l'Energie..... 215
Flottage de l'Energie..... 215
Captage des forces naturelles par les accumulateurs..... 215

Digitized by Google

TABLE DES FIGURES

Figures.		Pages.
1.	— Voltamètre à fils métalliques	19
2.	— Voltamètre et galvanomètre	19
3.	— Voltamètre chargé par une pile primaire	20
4.	— Décharge d'un voltamètre sur un galvanomètre	21
5.	— Voltamètre à lames de plomb	28
6.	— Voltamètre à lames de plomb chargé par une pile	29
7.	— Décharge d'un voltamètre à lames de plomb	30
8.	— Première pile secondaire de Planté	46
9.	— Plan d'un accumulateur Planté à lames parellèles	47
10.	— Accumulateur Planté à lames parallèles	47
11.	— Deux accumulateurs Planté couplés en tension	48
12.	— Accumulateur Planté, modèle en spirale	49
13.	— Accumulateur Planté, chargé par une pile	50
14.	— Électrode de Kabath	61
15.	— Accumulateur de Kabath	61
16.	— Électrode Simmen	64
17.	— Plaque Simmen et Reynier	66
18.	— Plaque plissée	68
19.	— Feuille de plomb triplée	69
20.	— Ancienne plaque Reynier	70
21.	— Expansion d'une plaque plissée	71
22.	— Plaque Reynier avant la formation	76
23.	— Plaque Reynier formée	77
24.	— Fourche isolante	80
25.	— Accumulateur Reynier	81
26.	— Accumulateur Denis Monnier, coupe longitudinale	84
27.	— — — coupe transversale	84
28.	— Électrode Faure, élévation	88
29.	— — — coupe en plan	88
30.	— Accumulateur Faure, modèle en spirale	89
31.	— Grille Faure-Volckmar	93
32.	— Plaque Faure-Volckmar	93

Digitized by Google

Figures.		Pages.
33.	— Accumulateur Faure-Sellon-Volckmar	96
34.	— Plaque Faure-Sellon-Volckmar	97
35.	— Grille Faure-Sellon-Volckmar	97
36.	— Coupe de la grille Faure-Sellon-Volckmar	97
37.	— Accumulateur Faure Sellon-Volckmar, fabrication E. P. S.	102
38.	— Coupe d'une plaque double	104
39.	— Plaque double	104
40.	— Accumulateur mixte Faure-Reynier	108
41.	— Détail d'un positif à arête renforcée	109
42.	— Positif à arête renforcée	109
43.	— Batterie d'accumulateurs mixtes	110
44.	— Électrode de Montaud	119
45.	— Collecteur de Montaud	119
46.	— Peigne de Montaud	120
47.	— Accumulateur de Montaud	121
48.	— Accumulateur au cuivre	126
49.	— Accumulateur d'Arsonval et Carpentier	129
50.	— Ancien accumulateur plomb — zinc	130
51.	— Cage isolante de l'ancien accumulateur plomb — zinc	130
52.	— Électrode positive de l'ancien accumulateur plomb — zinc	130
53.	— Ancienne plaque plissée	131
54.	— Ancien négatif à poche	132
55.	— Ancien accumulateur plomb — zinc à électrodes suspendues	133
56.	— Positif Reynier	134
57.	— Pile de Lalande et Chaperon, modèle horizontal	137
58.	— — — modèle vertical	138
59.	— Diagramme de la décharge d'un accumulateur Faure-Volckmar	160
60.	— Diagramme de la décharge lente d'un accumulateur Fitz-Gérald	164
61.	— Diagramme de la décharge rapide d'un accumulateur Fitz-Gérald	165
62.	— Expérience de MM. Planté et Niaudet	195

Digitized by Google

PREMIÈRE PARTIE

PRINCIPES

Digitized by Google

Digitized by Google

CHAPITRE PREMIER

DÉFINITIONS

VOLTAMÈTRE A FILS MÉTALLIQUES. — FORCE ÉLECTROMOTRICE SECONDAIRE ; COURANT SECONDAIRE. — POLARITÉS SECONDAIRES. — ACCUMULATEURS VOLTAÏQUES OU PILES SECONDAIRES.

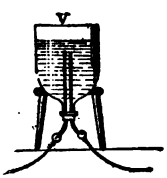


Figure 1.

Voltamètre à fils métalliques. — V (fig. 1) est un récipient de verre contenant de l'eau acidulée sulfurique. Deux fils de platine, qui ne se touchent point, sont immergés dans le liquide et sortent par le bouchon d'une tubulure inférieure.

Si l'on joint ces fils aux bornes d'un galvanomètre G (fig. 2), celui-ci n'accuse le passage d'aucun courant. Les

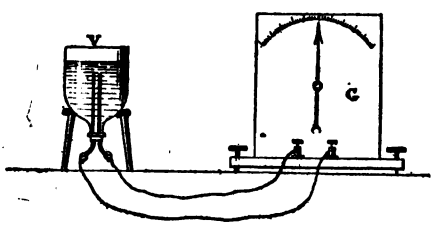


Figure 2.

Digitized by Google

deux fils étant physiquement symétriques par rapport au liquide, il n'y a pas de raison pour qu'il s'établisse entre eux une différence de potentiel. Mais le système, qui est inerte par lui-même, peut devenir actif par l'action d'une source électrique extérieure.

Relions les deux fils respectivement aux deux pôles d'une pile (fig. 3), en intercalant le galvanomètre dans le cir-

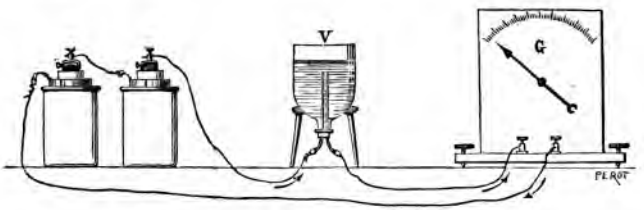


Figure 3.

cuit : l'aiguille est déviée, indiquant le passage d'un courant, qui va du pôle positif au pôle négatif de la pile, dans le circuit extérieur de celle-ci.

Peu de temps après la fermeture du circuit, on voit des bulles gazeuses se dégager sur les deux fils immergés. Les volumes des gaz libérés peuvent donner la mesure de la quantité d'électricité qui passe dans le circuit : d'où le nom de *voltamètre* donné à l'appareil, et, d'une manière générale, à tout *système composé de deux conducteurs immergés dans un liquide électrolysable.*

Force électromotrice secondaire ; courant secondaire. — Par le passage du courant, le voltamètre

Digitized by Google

acquiert une force électromotrice ; il devient ainsi un véritable couple voltaïque appelé *couple secondaire*, et peut donner un courant électrique qu'on nomme *courant secondaire*.

Ce courant secondaire peut être facilement constaté.

Rompons les communications de la pile avec le voltamètre, et relions directement les électrodes de celui-ci aux bornes du galvanomètre (fig. 4). Aussitôt, nous voyons de

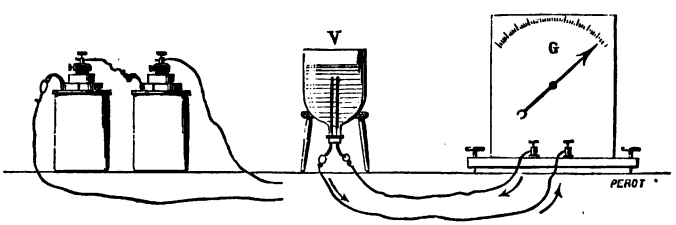


Figure 4.

nouveau l'aiguille dévier, accusant le passage du *courant secondaire*.

Polarités secondaires. — Le sens de la déviation indique les polarités respectives des deux fils : l'électrode qui était reliée au pôle positif de la pile de charge est devenue le pôle positif du couple secondaire — son pôle négatif correspondant par conséquent au pôle négatif de la source d'électricité. En termes plus brefs : *les pôles de la source électrique donnent respectivement leurs noms aux électrodes correspondantes du voltamètre*.

Ainsi, pendant la charge, le couple secondaire est *en*

Digitized by Google

opposition avec la source. Celle-ci, ayant une force électromotrice supérieure, donne le sens du *courant de charge*, lequel *traverse le voltamètre en allant de l'électrode positive à l'électrode négative à travers le liquide électrolysé*. Quand le voltamètre se décharge, *le courant secondaire va de son électrode positive à son électrode négative dans le circuit extérieur*, comme dans toute pile voltaïque. Ce qu'on exprime d'une manière sensible en disant que *le courant secondaire marche en sens inverse du courant primaire* (Voir les fig. 3 et 4).

Ces phénomènes, qu'on se borne quant à présent à constater, trouveront plus loin leur explication.

Accumulateurs voltaïques ou piles secondaires. — Un *accumulateur voltaïque* est un voltamètre capable *d'emmagasiner une grande quantité d'énergie électrique*, de la *conserver* au besoin pendant un certain temps, et de la *restituer*, sans trop grande perte, sous forme de *courant secondaire utilisable*.

M. Gaston Planté a, le premier, inventé un accumulateur voltaïque répondant à cette définition (Mars 1860). Divers physiciens avaient, avant lui, observé les *courants secondaires ;* on avait même construit des *piles secondaires*, mais nul n'avait aperçu la possibilité de donner à ces appareils la puissance, la capacité, la permanence et le rendement nécessaires à des accumulateurs utilisables. Depuis les travaux de M. Gaston Planté, l'expression de *pile secondaire* a pris une signification qu'elle n'avait pas antérieurement : elle est devenue synonyme du mot *accumulateur voltaïque*.

Digitized by Google

Voltamètres divers. — En faisant varier la nature des deux électrodes et du liquide, on peut combiner de nombreux systèmes voltamétriques. Mais les combinaisons qu'on peut ainsi former ne sont pas toutes aptes à produire des courants secondaires *utilisables*, et à servir de base à des systèmes d'accumulateurs. En fait, les *voltamètres exploitables* sont en petit nombre.

L'étude de ces systèmes voltamétriques doit logiquement précéder celle des piles secondaires qui en dérivent. Tel est l'ordre d'exposition adopté dans cet ouvrage :

Prenant les principaux systèmes *d'accumulateurs* à leur principe, on étudiera leurs propriétés fondamentales dans la forme élémentaire du *voltamètre*. Les *genres* étant ainsi caractérisés, les *espèces* viendront naturellement s'y classer, et leur étude pourra être réduite à l'examen des particularités offertes par chacune d'elles.

Digitized by Google

Digitized by Google

CHAPITRE II

LES VOLTAMÈTRES

VOLTAMÈTRE *platine — acide sulfurique dilué.* — VOLTAMÈTRE *plomb — acide sulfurique dilué.* — VOLTAMÈTRE *plomb — solution de sulfate de cuivre.* — VOLTAMÈTRE *plomb — solution de sulfate de zinc.* — VOLTAMÈTRES AU CHARBON. — VOLTAMÈTRE *cuivre — solution de zincate alcalin.* — VOLTAMÈTRES A AMALGAMES ALCALINS. — LES VOLTAMÈTRES EXPLOITABLES. CLASSIFICATION DES ACCUMULATEURS.

Voltamètre platine—acide sulfurique dilué. — Ce voltamètre, monté dans la forme *fig. 1* et chargé par une pile, donne un courant secondaire qui décroît rapidement jusqu'à zéro. Il faut donc observer la décharge aussitôt après la rupture du courant primaire.

Le courant secondaire est dû, comme dans tous les voltamètres, aux réactions chimiques des corps produits, par l'électrolyse, sur les électrodes et autour d'elles. La positive est superficiellement oxydée, entourée d'oxygène et de quelques composés instables : ozone, eau oxygénée, acide persulfurique; la négative est superficiellement *réduite*, entourée d'hydrogène, et sans doute quelque peu alliée à ce métal.

A l'exception de l'hydrogène et de l'oxygène respectivement fixés sur les électrodes, les produits de l'électrolyse sont spontanément et rapidement décomposés ou

Digitized by Google

dissipés : ce qui explique le prompt affaiblissement du courant secondaire.

Si l'on recouvre chaque électrode d'une cloche, comme on le fait pour l'expérience de l'électrolyse de l'eau, l'oxygène et l'hydrogène sont emprisonnés sur les électrodes. Le voltamètre ainsi chargé peut fournir un courant, peu intense, mais de longue durée. C'est une sorte d'accumulateur rudimentaire, conservant sa charge ; accumulateur faible mais constant, d'une capacité restreinte mais définie, d'un rendement peu élevé mais mesurable.

On trouve le voltamètre *platine — acide sulfurique* au seuil de l'histoire des courants secondaires. Il est curieux de constater que Carlisle et Nicholson construisirent, *à leur insu*, une vague ébauche d'accumulateur, en opérant l'électrolyse de l'eau. Mais c'est Gautherot qui, le premier, découvrit l'existence des *courants secondaires* (1801), avec des fils de platine et d'argent ayant servi à électrolyser l'eau salée.

Un peu plus tard, Ritter construisit ses *piles secondaires* avec des disques métalliques séparés par des rondelles de drap humectées de dissolutions salines. Volta, Marianini et Becquerel démontrèrent que les courants secondaires ont une cause chimique. Mattenci obtint des courants avec des lames de platine préalablement plongées dans l'oxygène et l'hydrogène.

Grove construisit ensuite son *couple à gaz*, composé de deux lames de platine plongées dans l'acide sulfurique

Digitized by Google

dilué, et recouvertes d'éprouvettes contenant, l'une de l'oxygène, l'autre de l'hydrogène. Huit à dix de ces couples, assemblés en tension, constituent une pile capable de décomposer l'eau d'un voltamètre placé dans le circuit extérieur. On a ainsi le spectacle de l'analyse de l'eau produite par la synthèse de ses éléments — et l'on voit les volumes des gaz diminuer dans les éprouvettes de la pile, en même temps qu'ils augmentent dans celles du voltamètre.

Cette belle expérience met en évidence la cause chimique des courants secondaires, et la *réversibilité des voltamètres.*

Elle démontre aussi la similitude d'action des piles et des accumulateurs. En effet, une pile de Grove, chargée avec des gaz préparés en dehors de l'appareil, est une véritable *pile primaire* préparée chimiquement; pourtant elle ne diffère pas essentiellement, quant à ses propriétés générales, des voltamètres chargés par le passage d'un courant électrique.

A la vérité, les piles primaires, chargées chimiquement, ne sont pas toutes régénérables par électrolyse; les piles secondaires, chargées par l'action d'un courant, ne sont pas toutes régénérables par des apports chimiques. Mais ces différences, d'ordre pratique, n'ont rien d'absolu.

Un accumulateur est une pile, une pile régénérable par électrolyse. Les lois physico-chimiques qui régissent les piles s'appliquent aux accumulateurs. Ceux-ci sont des cas particuliers de celles-là.

Le couple *platine—acide sulfurique* fournit une démonstra-

Digitized by Google

tion élégante de ces principes fondamentaux. Il doit donc trouver place en tête de l'étude générale des voltamètres, bien qu'il soit impropre à fournir un accumulateur utilisable.

Voltamètre plomb—acide sulfurique dilué. — Ce voltamètre, le plus important de tous, fournit le principe de presque tous les accumulateurs actuellement en usage dans les laboratoires et dans l'industrie. Ses propriétés ont été découvertes par M. Gaston Planté (1859).

Le plomb étant un métal peu coûteux, on peut donner une grande surface aux électrodes du voltamètre à étudier, pour amplifier les effets obtenus. Les deux fils du voltamètre classique sont donc remplacés ici par deux lames assez larges (fig. 5), placées dans un récipient de verre, sans contact entre elles à l'intérieur du liquide.

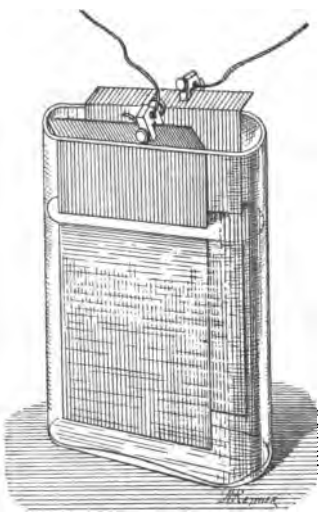


Figure 5.

Digitized by Google

Quand on ferme sur ce voltamètre le circuit d'une pile (fig. 6), l'eau acidulée est électrolysée. L'électrode négative,

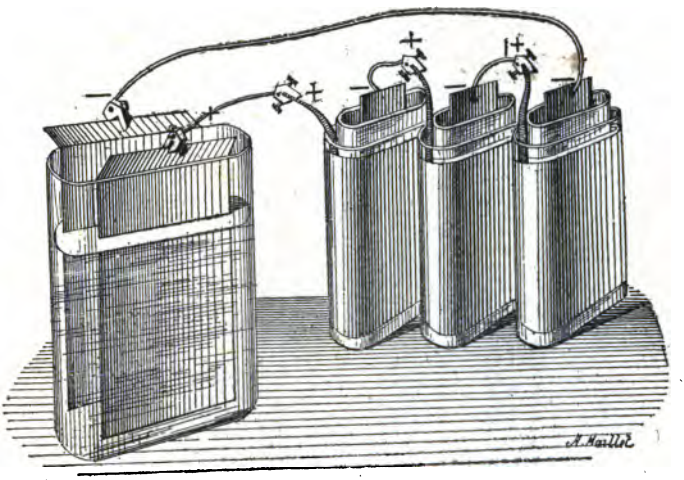


Figure 6.

qui avait primitivement la couleur grise du plomb oxydé à l'air, prend la teinte plus claire du plomb réduit, et bientôt nous voyons apparaître sur elle un dégagement d'hydrogène.

En même temps, l'oxygène se fixe sur l'électrode positive, dont la surface se couvre de peroxyde de plomb. La peroxydation attaque plus rapidement la face interne, mais elle gagne aussi la face externe de l'électrode. Quand toute la surface est peroxydée, l'oxygène commence à se dégager : ce phénomène indique que le voltamètre a pris toute la *charge* qu'il est susceptible de recevoir.

Ainsi chargé, le voltamètre peut fonctionner comme un couple voltaïque, mais pendant un temps très court. Si l'on

Digitized by Google

joint ces électrodes aux bornes d'un galvanomètre médiocrement sensible (fig. 7), le couple secondaire se décharge

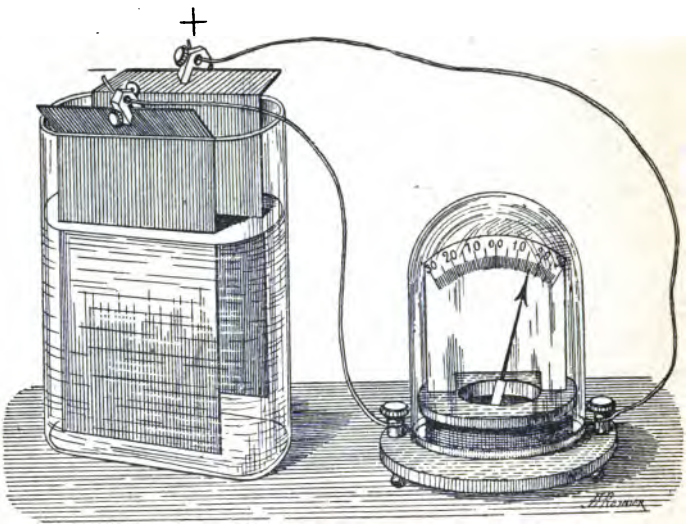


Figure 7.

dans le fil de l'instrument en faisant dévier l'aiguille. Pendant la décharge, nous voyons l'électrode négative se ternir, tandis que la positive s'éclaircit un peu.

La double réaction qui se révèle ainsi est la fixation d'un équivalent d'acide sulfurique sur chaque électrode, avec transport d'un équivalent d'oxygène de la positive à la négative.

C'est-à-dire qu'on a, sur l'électrode positive :

$$PbO^2 + SO^3 = SO^4Pb + O,$$

Digitized by Google

Et sur l'électrode négative :

$$Pb + SO^3 + O = SO^4Pb \text{ (1)}.$$

Quand on charge de nouveau le voltamètre, les réactions chimiques se produisent en sens inverse, pour ramener le sulfate de plomb à l'état de plomb réduit d'une part, de plomb peroxydé de l'autre; mais cette seconde charge intéresse une plus grande quantité de matières, parce que le plomb et le peroxyde (régénérés du sulfate) se présentent sous un état perméable, qui permet à l'action électrolytique d'atteindre le plomb sous-jacent et de pénétrer plus profondément, surtout du côté peroxydé.

Ainsi, à chaque nouvelle charge l'action chimique gagne en profondeur. Il en résulte un *accroissement* correspondant de la capacité d'accumulation. M. Gaston Planté a donné à cet accroissement progressif le nom de *formation*.

Quand un voltamètre est profondément *formé*, il est capable d'une quantité d'électricité assez grande : il mérite alors le nom de *couple secondaire* ou *accumulateur*.

La *formation* marche plus vite du côté positif que du côté négatif : d'où l'utilité de *retourner* de temps en temps l'accumulateur, c'est-à-dire d'intervertir ses communications avec la source, pour changer le sens de la charge. M. Gaston Planté, qui a créé de toutes pièces l'accumulateur à électrodes de plomb, a indiqué comment on peut obtenir une formation poussée loin au moyen de charges,

(1) Cette interprétation chimique des phénomènes de la décharge est postérieure aux *Recherches* de M. Gaston Planté.

Digitized by Google

décharges, retournements et repos pratiqués méthodiquement (1).

On reviendra sur cette importante question de la formation, en traitant des accumulateurs proprement dits.

M. Gaston Planté a constaté que la force électromotrice des voltamètres présente des variations notables. On a repris plus tard l'étude de ces variations, et on en a donné la mesure pour les systèmes les plus importants (2).

Dans le voltamètre *plomb — acide sulfurique*, la force électromotrice secondaire peut monter jusqu'à 3 volts après une charge intense; elle descend bientôt vers 1,volt 9 ou 1,volt 8 — puis baisse plus lentement jusqu'à zéro.

La force électromotrice normale de l'appareil est 1,volt 9 environ. La surélévation fugitive observée aussitôt après la charge, est due à la présence de produits instables (eau oxygénée, ozone, acide persulfurique....) qui se décomposent spontanément (3).

Voltamètre plomb — solution de sulfate de cuivre. — Ce voltamètre est agencé comme le précédent (fig. 5); il a, comme lui, pour électrodes, deux lames de plomb; mais l'eau acidulée sulfurique est remplacée par une dissolution de sulfate de cuivre.

(1) *Recherches sur l'Electricité*, page 53 et suivantes.

(2) *Sur les variations de la force électromotrice dans les Accumulateurs*, dans l'ouvrage PILES ÉLECTRIQUES ET ACCUMULATEURS, par Emile Reynier.

(3) Gaston Planté, *loc. cit.*

Digitized by Google

L'appareil peut être chargé avec deux couples Daniell ou un seul couple Bunsen; car l'emploi du sel de cuivre abaisse la force électromotrice secondaire.

Pendant la charge, l'électrode positive se peroxyde et prend la teinte *puce*, comme dans le voltamètre à eau acidulée; l'électrode négative se recouvre rapidement d'un dépôt galvanoplastique de cuivre pur.

Si les lames de plomb sont neuves, le dégagement d'oxygène gazeux apparaît assez vite sur la lame peroxydée. Sur la lame cuivrée, le métal continue à se déposer, tant que le liquide peut en fournir; la solution se décolore peu à peu. Quand le sulfate de cuivre est entièrement décomposé, un dégagement d'hydrogène se produit sur l'électrode négative.

La décharge de ce voltamètre présente trois phases, comme celle du voltamètre précédent. La force électromotrice secondaire est d'abord surélevée : elle peut être de 1,^{volt} 7 ou 1,^{volt} 8 aussitôt après une charge intense; si le courant primaire est faible, elle ne dépasse guère 1,^{volt} 5. Dans tous les cas, la force électromotrice tombe rapidement à 1,^{volt} 25 et se maintient assez près de cette valeur pendant la plus grande partie de la décharge, pour tomber ensuite vers zéro. La force électromotrice normale du voltamètre à sulfate de cuivre est donc 1,^{volt} 25.

Les réactions chimiques de la décharge consistent dans la sulfatation des deux électrodes. On a au positif :

$$PbO^2 + SO^3 = SO^4Pb + O,$$

et au négatif :

$$Cu + SO^3 + O = SO^4 Cu.$$

Digitized by Google

Le sulfate de cuivre se dissout et restitue au liquide sa teinte bleue.

Il faut remarquer qu'au négatif, c'est le dépôt superficiel de cuivre qui constitue la partie active de l'électrode, la lame de plomb servant seulement de support et de conducteur au métal électrolysé. Ce support conducteur pourrait être en cuivre, en charbon ou en un métal insoluble autre que le plomb. Cependant le plomb convient mieux pour un voltamètre d'étude, parce qu'il ne complique pas les phénomènes à observer par la production d'une force électromotrice initiale et finale causée par l'hétérogénéité des lames.

Le voltamètre au sulfate de cuivre conserve assez bien sa charge. Son électrode négative reçoit son dépôt galvanoplastique, sans préparation préalable : la *formation* du couple, nécessaire seulement au positif, peut donc être faite par des charges successives, sans retournement.

Malgré cet avantage, le couple secondaire au sulfate de cuivre est resté inférieur au couple Planté, pour des raisons qui seront exposées plus loin.

Voltamètre plomb—solution de sulfate de zinc. — Il diffère des précédents par son liquide, qui est une dissolution de sulfate de zinc (fig. 5).

Quand on met ce voltamètre dans le circuit de la pile de charge (fig. 6), on voit bientôt la lame positive prendre la couleur *puce* du peroxyde de plomb, tandis que la négative

Digitized by Google

se couvre de zinc pur. L'oxygène gazeux se dégage sur l'électrode positive, lorsque sa surface est entièrement peroxydée. Sur la lame négative, de l'hydrogène apparaît presqu'au début de la charge, parce que le zinc déposé est vivement attaqué par le liquide. Cet hydrogène n'est donc pas libéré directement par l'électrolyse; il est dégagé par la dissolution du zinc électrolysé.

La décharge du voltamètre au sulfate de zinc présente deux phases principales (1).

Dans les premiers instants qui suivent la charge, la force électromotrice est *surélevée* à 2,8 volts, 2,6 volts, 2,5 volts; mais elle descend vite à sa valeur normale, qui est 2,4 volts à 2,3 volts. Elle se maintient pendant un certain temps entre 2,3 volts et 2 volts.

Puis il se produit une chute brusque vers 0,6 volt. La force électromotrice baisse ensuite lentement de 0,6 volt à 0,4 volt. Cette deuxième phase est plus longue que la première. Elle se termine par une descente assez rapide vers zéro.

Des réactions chimiques différentes correspondent à ces deux phases de la décharge.

Pendant la première, il y a sulfatation des deux électrodes, avec transport d'un équivalent d'oxygène de la positive à la négative, comme dans les voltamètres précédents :

$$\underbrace{PbO^2}_{\text{Electrode positive.}} + \underbrace{Zn}_{\text{Electrode négative.}} + 2SO^3 = \underbrace{SO^4Pb}_{\text{Electrode positive.}} + \underbrace{SO^4Zn}_{\text{Electrode négative.}}$$

(1) Emile Reynier, *Séances de la Société Française de Physique*, 4 avril 1884.

Digitized by Google

Cette première phase de la décharge est seule utilisable. La force électromotrice correspondante est 2,3 volts en moyenne.

Pendant la seconde phase, il y a sulfatation d'un deuxième équivalent de zinc à l'électrode négative, avec transport d'un équivalent d'hydrogène sur le sulfate de plomb positif, qui se résout en plomb métallique et acide sulfurique :

$$\underbrace{SO^4Pb}_{\text{Electrode positive.}} + \underbrace{Zn}_{\text{Electrode négative.}} + SO^4H = \underbrace{Pb}_{\text{Electrode positive.}} + SO^4H + \underbrace{SO^4Zn}_{\text{Electrode négative.}}$$

La force électromotrice moyenne correspondante à cette deuxième phase est 0,55 volt environ.

Si l'on charge de nouveau le voltamètre, la quantité de matières intéressées sera plus grande que la première fois, parce que le plomb positif, d'abord *peroxydé* par la charge, puis sulfaté par la première partie de la décharge, est finalement redevenu métallique à l'état perméable. Il est apte alors à se laisser peroxyder plus profondément par la deuxième charge ; il y a *formation*.

On reviendra là-dessus en parlant des *accumulateurs plomb—zinc*, qui sont intéressants à cause de leur force électromotrice élevée.

Il faut noter, dès à présent, cette propriété du système, qui réduit complètement, par une décharge à fond, le peroxyde de plomb en plomb métallique perméable; ce qui permet de *former* des accumulateurs au zinc assez vite et *sans retournement*.

Digitized by Google

Voltamètres à charbons. — Quelques inventeurs ont cherché à faire des couples secondaires avec du charbon, comptant peut-être sur les propriétés absorbantes de ce corps pour emmagasiner les gaz de l'électrolyse. Mais les volumes gazeux que peuvent absorber deux électrodes de charbon correspondent à une bien faible quantité d'électricité.

Avec l'eau acidulée sulfurique, les produits d'électrolyse retenus par deux électrodes de charbon, sont complexes et instables. La force électromotrice secondaire baisse très vite. Aussitôt après la charge, elle peut atteindre 3 volts; mais en quelques minutes elle descend spontanément au-dessous de 1 volt.

Par une électrolyse prolongée, la plaque positive est attaquée et se désagrège rapidement; la négative s'altère aussi, mais beaucoup moins vite. Une boue noirâtre se dépose au fond du récipient, et le liquide se souille de matières brunes carbonées formées aux dépens des plaques.

Cette destruction des électrodes s'est produite, plus ou moins vite, avec tous les liquides essayés. Le charbon semble donc impropre à constituer les électrodes d'un accumulateur durable; tout au plus peut-il servir comme support d'un dépôt galvanoplastique, au négatif seulement.

Ainsi s'explique l'insuccès général des accumulateurs au charbon.

Il faut citer pourtant une tentative de M. Varley. Son accumulateur était constitué par des électrodes de carton

Digitized by Google

calciné, plongeant dans une dissolution de sulfates de zinc et de manganèse : le courant primaire déposait du zinc sur l'électrode positive et du peroxyde de manganèse sur la négative.

La force électromotrice secondaire d'un voltamètre *charbons—zinc—manganèse* peut dépasser 3 volts ; mais elle descend vite aux environs de 2 volts, et bientôt tombe fort au-dessous. Une étude persévérante de ce système pourrait peut-être conduire à des résultats pratiques, si les électrodes (la positive surtout) n'étaient condamnées à périr en peu de temps.

Avant les essais de M. Varley, M. Maiche avait tenté (1881) la régénération électrolytique des piles Leclanché, qui sont des couples zinc—manganèse. Cette idée n'a pas eu de suite.

Plus récemment, M. Basset (1) a essayé des accumulateurs constitués par des électrodes de charbon plongées dans des mélanges électrolysables pâteux, composés d'oxydes métalliques imprégnés de solutions salines — tels que sesquioxyde de fer et protochlorure du même métal, massicot et nitrate de plomb, etc. On aurait pu prévoir l'insuccès de ces diverses combinaisons pour plusieurs raisons, dont la principale est la destruction des plaques positives.

(1) Brevet français, n° 179 710, du 17 novembre 1886.

Digitized by Google

Voltamètres cuivre—zincate alcalin. — Un courant électrique qui traverse, entre deux électrodes de cuivre, une solution de zincate de potasse ou de soude, oxyde la lame positive et dépose du zinc sur l'électrode négative (1).

Le zinc électrolysé forme une bonne couche galvanoplastique, peu attaquée en circuit ouvert; le sous-oxyde de cuivre est, d'autre part, *presque* insoluble dans le liquide. Les produits stables de l'électrolyse étant bien fixés sur les lames, le couple secondaire peut conserver sa charge.

Sa force électromotrice normale est inférieure à 1 volt; elle est, comme dans tous les voltamètres, plus élevée au moment où l'on interrompt la charge : sa valeur dépend alors de la force électromotrice de la source et de l'intensité du courant primaire.

Le voltamètre au zincate alcalin semble propre à emmagasiner l'énergie voltaïque. MM. de Lalande et Chaperon, qui ont découvert ses propriétés, ont essayé autrefois de les utiliser dans la construction des accumulateurs. MM. Commelin, Desmazures et Bailhache ont repris récemment l'étude de ce système avec un certain succès.

Voltamètres à amalgames alcalins. — Les piles primaires qui possèdent les plus grandes forces électro-

(1) De Lalande et Chaperon.

Digitized by Google

motrices, sont celles dont l'électrode soluble est un métal alcalin (potassium, sodium, ammonium) allié au mercure. On sait, par exemple, que le couple *amalgame de potassium, eau acidulée sulfurique, peroxyde de plomb* a une force électromotrice de trois volts et demi.

On peut réaliser un couple secondaire semblable, en prenant pour électrode positive une lame de plomb, pour liquide du sulfate de soude, pour électrode négative du mercure contenu dans un vase poreux; un fil de platine plongeant dans le mercure est le pôle négatif du couple.

Ce voltamètre ne donne que des courants secondaires de courte durée, car l'amalgame alcalin ne peut pas être conservé au contact d'une solution aqueuse. D'ailleurs, la quantité d'électricité disponible serait petite, car les métaux alcalins ne s'allient au mercure qu'en faibles proportions.

Les voltamètres exploitables. — Parmi les nombreuses combinaisons voltamétriques qu'on peut former en variant les électrodes et les liquides, il y en a peu qui soient utilisables dans la construction des accumulateurs, car il faut écarter :

1° Les systèmes qui empruntent des matières précieuses telles que l'or, le palladium, le platine, l'argent....;

2° Ceux qui nécessitent l'emploi du charbon au pôle positif;

3° Les combinaisons comportant plus d'un métal soluble et transportable en dépôt galvanoplastique;

Digitized by Google

4° Les systèmes dont la force électromotrice utilisable est trop petite;

5° Ceux qui répandraient des vapeurs corrosives ou infectes.

Ainsi les voltamètres à acide sulfurique avec électrodes d'or, d'argent, de cuivre, de fer, de zinc, d'aluminium — combinaisons étudiées par M. Gaston Planté — sont inexploitables. On a donc laissé de côté l'étude de ces systèmes, dont les propriétés caractéristiques sont d'ailleurs décrites dans l'œuvre du Maître.

Les sept combinaisons examinées ici sont seules intéressantes, au point de vue de la production des courants secondaires. Encore faut-il, au seuil de l'étude des accumulateurs proprement dits, abandonner trois de ces systèmes : ceux à électrodes de platine, à lames de charbon et à amalgames alcalins.

Classification des accumulateurs. — Les systèmes voltamétriques susceptibles d'accumuler restent donc au nombre de quatre : d'où quatre GENRES d'accumulateurs.

Chacun de ces genres comporte des dispositifs divers, modes de *formation*, etc.; variantes assez nombreuses constituant des ESPÈCES.

Les accumulateurs existants seront donc classés en quatre genres, savoir :

1° Le genre *Plomb—acide sulfurique*, auquel on doit donner le nom de M. Gaston Planté, car ce savant a

Digitized by Google

découvert le système et ses premières *espèces*. Le genre Planté, premier en date, est le plus important; il est employé presque exclusivement dans la pratique industrielle;

2° Le genre *Plomb—sulfate de cuivre*, presque inusité;

3° Le genre *Plomb—sulfate de zinc*, peu pratiqué jusqu'à présent, mais intéressant à cause de sa force électromotrice élevée et de certaines propriétés spéciales;

4° Le genre *Cuivre—zincate alcalin*, qui a fait récemment de bruyants débuts.

Digitized by Google

DEUXIÈME PARTIE

LES ACCUMULATEURS VOLTAÏQUES

Digitized by Google

Digitized by Google

CHAPITRE III

LES ACCUMULATEURS PLANTÉ

PREMIÈRES PILES SECONDAIRES PLANTÉ. — PILES SECONDAIRES A LAMES PARALLÈLES. — ACCUMULATEURS EN SPIRALE. — ACTIONS CHIMIQUES PRODUITES DANS LES COUPLES SECONDAIRES DE PLANTÉ. — FORMATION. — FORMATION ACCÉLÉRÉE. — CAPACITÉ VOLTAIQUE. — CONSTANTES. — FORMATION AUTOGÈNE; FORMATION HÉTÉROGÈNE.

Premières piles secondaires de Planté. — Au cours de ses études sur les voltamètres, M. Planté trouva « que la force électromotrice secondaire d'un voltamètre à « lames de plomb dans l'eau acidulée sulfurique était plus « énergique et plus persistante que celle des autres mé- « taux (1). » Il prit donc le plomb et l'eau acidulée comme matériaux essentiels de ses piles secondaires (mars 1860) : choix fort heureux, car on n'a pas découvert, jusqu'à présent, de système électrochimique préférable à celui-ci.

Pour obtenir une pile secondaire de faible résistance, M. Planté donna à ses électrodes une grande surface. Son premier couple était constitué par deux longues bandes de

(1) *Recherches sur l'électricité*, p. 34.

Digitized by Google

plomb placées l'une sur l'autre, séparées par une toile grossière, et roulées en spirale, — dispositif analogue à celui employé antérieurement par Offerhaus et Hare pour les piles primaires. L'appareil (fig. 8) était plongé dans un bocal de

Figure 8.

verre, contenant de l'eau acidulée sulfurique au dixième en volume.

Les deux électrodes avaient une surface totale dépassant un mètre carré.

Ce couple secondaire, préalablement chargé pendant quelques minutes par une pile de deux couples de Grove, donnait un courant intense, mais de courte durée.

Les appareils ainsi construits étaient bientôt mis hors de service par des contacts internes. La toile isolante,

Digitized by Google

s'altérant dans l'eau acidulée, laissait les électrodes se toucher (1).

Piles secondaires à lames parallèles. — Pour obvier à cet inconvénient, M. Planté adopta (1868) un dispositif à lames planes parallèles, alternativement positives et négatives, — les lames de même nom étant respectivement reliées entre elles, au-dessus du liquide, par des prolongements externes. Les feuillets de plomb, très rapprochés les uns des autres, étaient disposés verticalement dans un vase en gutta percha de forme rectangulaire, et séparés en leur milieu par des baguettes isolantes. Des rainures verticales, pratiquées dans les parois du vase, recevaient les extrémités des électrodes et les maintenaient à leur place.

Figure 9.

La figure 10 représente un accumulateur ainsi construit,

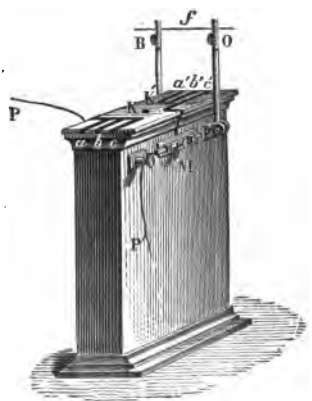


Figure 10.

(1) Les contacts internes proviennent surtout d'une sorte d'incrustation de la

Digitized by Google

dont la figure 9 (plan) détaille la disposition. Les lames positives se prolongent en *a*, *b*, *c*, les négatives en *a'*, *b'*, *c'* ; les premières sont reliées à la borne P, les secondes à la borne P'. Les fils de la pile primaire viennent s'attacher en P et P'. B et O sont des pinces entre lesquelles on peut serrer des fils métalliques destinés à être rougis ou fondus par le courant secondaire. Ces pinces communiquent respectivement avec P et P' ; un commutateur M permet d'établir ou d'interrompre la décharge.

La figure 11 fait voir deux couples construits de la même

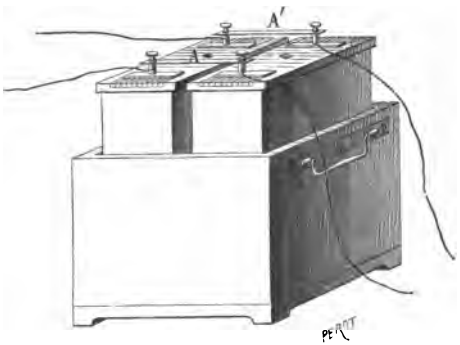


Figure 11.

manière, et assemblées *en tension*. Ce dessin est extrait d'un mémoire de M. Planté, publié dans les *Annales de Chimie et de Physique*, en septembre 1868. Dès cette époque, le célèbre physicien pratiquait ce dispositif, fort employé

cloison qui, s'imprégnant de plomb et d'oxydes, ferme des dérivations entre les lames.

Digitized by Google

aujourd'hui dans la construction des accumulateurs industriels.

Accumulateurs en spirale. — Un peu plus tard, M. Planté revint à son premier dispositif à électrodes enroulées, qui a l'avantage de pouvoir être économiquement construit, et monté dans des récipients de verre permettant de suivre la marche des phénomènes. La toile grossière fut alors remplacée par des bandes isolantes en caoutchouc (1872). La figure 12 montre le couple ainsi

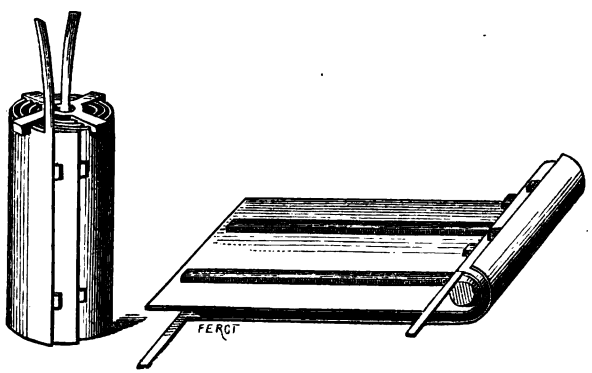


Figure 12.

modifié et son mode de fabrication. La figure 13 le représente dans son récipient de verre et surmonté d'un couvercle d'ébonite, lequel porte des pinces A, A', pour serrer les fils destinés à être traversés par le courant de décharge, et un interrupteur R d'une disposition simple et commode. Une pile primaire, composée de deux petits éléments Bunsen, charge l'appareil.

Digitized by Google

Sous cette forme, devenue classique, les couples secondaires Planté se sont répandus à des centaines d'exemplaires

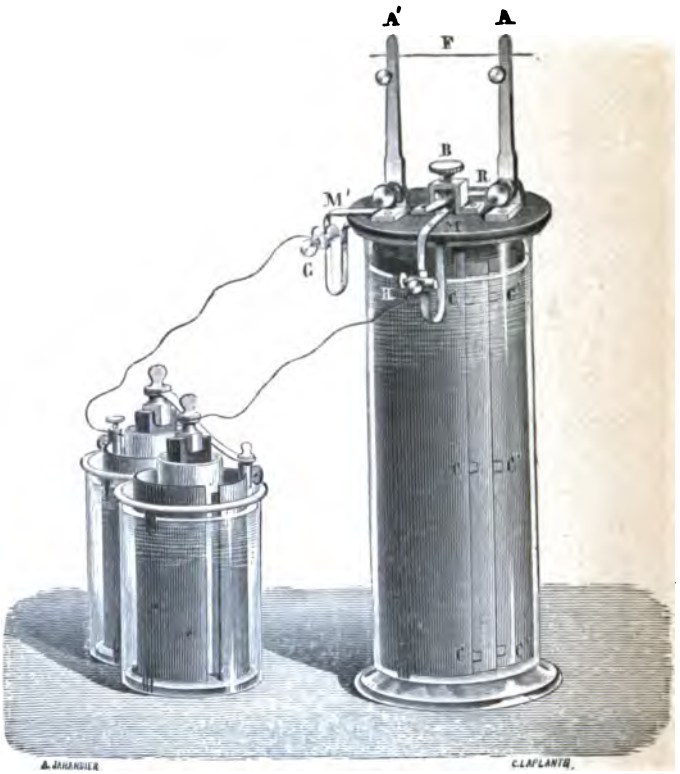


Figure 13.

dans les laboratoires. Ils ont servi à l'inventeur pour les originales et belles expériences qu'il a décrites dans ses magistrales *Recherches*.

Digitized by Google

Actions chimiques produites dans les couples secondaires de Planté. — Les réactions chimiques correspondant à la décharge des accumulateurs Planté consistent, comme on l'a déjà dit, en la production de deux équivalents de sulfate de plomb :

$$\underbrace{PbO^2}_{\text{Electrode positive.}} + 2SO^3 + \underbrace{Pb}_{\text{Electrode négative.}} = \underbrace{SO^4Pb}_{\text{Electrode positive.}} + \underbrace{SO^4Pb}_{\text{Electrode négative.}}$$

la charge produisant des réactions inverses (1).

Le courant secondaire fourni par un couple neuf est de courte durée, parce que l'imperméabilité du plomb compact limite les actions électrochimiques de la charge et de la décharge.

Formation. — On a expliqué plus haut (p. 31) comment la durée de la décharge s'accroît par des charges succes-

(1) Il faut rappeler ici l'histoire de cette théorie de la double sulfatation, pour détruire certaines erreurs d'attribution.

M. Gaston Planté avait depuis longtemps constaté la présence du sulfate de plomb sur les électrodes de ses couples secondaires; mais il considérait ce sulfate comme un produit accessoire, et non comme le résultat normal d'une attaque électrolytique. Divers auteurs ont, à la suite de M. Planté, admis que les actions électrochimiques se produisaient seulement entre le plomb et les éléments de l'eau; l'acide sulfurique n'étant pour eux qu'un adjuvant conducteur.

MM. Gladstone et Tribe ont les premiers (1882) admis que l'acide sulfurique agit directement sur les électrodes.

Dans un ESSAI SUR LA THÉORIE CHIMIQUE DES ACCUMULATEURS (*Société française de Physique*, 4 avril 1884), l'auteur de ce livre a examiné et discuté les diverses théories alors en présence; il s'est prononcé pour la double sulfatation, en apportant à cette théorie des arguments nouveaux et décisifs. Cette communication, vivement controversée, n'a pas pu passer inaperçue — car elle fut reproduite dans les *Séances* de la Société, dans *L'Electricien*, dans le *Journal de Physique*, dans l'ouvrage *Piles Electriques et Accumulateurs*, etc.

On a donc le droit de s'étonner quand on voit certains auteurs, tardivement convertis à la théorie de la double sulfatation, attribuer cette théorie à MM. Crova

Digitized by Google

sives. Cet accroissement de la capacité voltaïque de l'accumulateur provient d'une modification superficielle des lames, qui deviennent perméables jusqu'à une certaine profondeur : ce qui permet aux actions électrochimiques de s'exercer sur des poids de matière plus considérables. Cette modification progressive de la structure du plomb a été désignée par M. Planté sous le nom de *formation*.

Un couple qu'on charge toujours dans le même sens, *se forme* beaucoup plus à l'électrode positive qu'à la négative : d'où la nécessité de faire de temps à autre des *retournements*, c'est-à-dire d'intervertir les polarités des lames.

M. Planté a observé qu'il est avantageux « de laisser un « intervalle de repos de plusieurs jours entre les change- « ments de sens, afin de donner aux dépôts d'oxyde et de « métal réduit le temps de prendre une texture cristalline « et une forte adhérence à la surface des lames..... Les « intervalles de repos dont il a été question ci-dessus, « entre les changements de sens du courant primaire, « ont la plus grande influence. Ainsi un couple secon- « daire dont les lames ont été soumises, plusieurs heures « de suite, à l'action du courant primaire, étant abandonné « à lui-même, pendant un mois, sans être déchargé, puis, « repris au bout de cet intervalle de temps et rechargé en

et Garbe qui ont attendu jusqu'au 1er janvier 1885 (*C. R. de l'Acad. des Sc.*) pour la proclamer — ou à M. Tscheltzow, qui a seulement fourni (*C. R. de l'Acad. des Sc., 8 juin 1885*) une vérification thermochimique, d'ailleurs prévue, en mesurant la chaleur de formation du peroxyde de plomb.

Digitized by Google

« sens inverse, donnera une décharge d'une durée double « de celle qu'il donnait auparavant. » (1)

Cet accroissement de la capacité voltaïque par le repos semble provenir de l'action d'un couple local constitué par le peroxyde de plomb et le plomb métallique sous-jacent (2) — couple dont l'action chimique serait exprimée par l'équation :

$$PbO^2 + Pb + 2SO^3 = 2SO^4Pb.$$

Un équivalent de peroxyde de plomb produit ainsi deux équivalents de sulfate, lesquels sont aptes à donner, par une charge subséquente, *deux* équivalents de peroxyde ou de plomb réduit.

Quant à la solidité et à la bonne adhérence ainsi obtenues, on peut sans doute l'expliquer par la production, dans l'eau acidulée, d'une solution sursaturée de sulfate de plomb, qui dépose lentement le sel sur les électrodes à l'état de cristaux fortement agrégés (3). Cette agrégation du sulfate s'obtient donc par un phénomène chimico-physique analogue à celui qui produit la *prise* des ciments, d'après la théorie nouvelle de M. Le Châtelier.

M. Planté a donné la méthode à suivre pour *former* ses couples par charges et décharges successives, avec *repos* prolongés et *retournements* faits en temps opportun (4).

(1) *Recherches sur l'électricité*, p. 35.

(2) Gladstone et Tribe.

(3) Émile Reynier.

(4) *Loc. cit.*, p. 53, 54 et 55.

Digitized by Google

Formation accélérée. — Cette méthode, longue et coûteuse, est presque impraticable industriellement. Les efforts des inventeurs qui, après M. Planté, tentèrent d'améliorer les accumulateurs, ont eu surtout pour objet d'abréger et de consolider la *formation*.

C'est M. Camille Faure qui, le premier, réussit à obtenir rapidement des capacités voltaïques considérables (1880). Avec lui, les accumulateurs rentrent dans la période industrielle. Les brillants résultats obtenus par M. Faure et proclamés par son collaborateur (1), provoquent l'émulation des inventeurs, qui viennent, nombreux, s'essayer sur un sujet jusqu'alors négligé. M. Planté lui-même reprend l'étude de ses accumulateurs au point de vue des applications pratiques, et trouve de nouveaux moyens d'accélérer leur *formation*.

Le célèbre physicien a d'abord préconisé le chauffage des couples pendant le passage du courant primaire :

« .... cette élévation de température a pour effet, en dilatant les pores métalliques du plomb (lames métalliques) de faciliter la pénétration de l'action électrolytique, c'est-à-dire la peroxydation profonde de la lame positive, et, par suite, la réduction à la même profondeur, de la lame négative oxydée par une action antérieure. Elle facilite aussi, par le contraste du refroidissement qui lui succède, l'agrégation cristalline du peroxyde de plomb et du plomb réduit, qui constitue un état favo-

(1) *Comptes rendus* de l'Académie des Sciences, séance du 18 avril 1881 : Note *sur la pile secondaire de M. C. Faure*, par Émile Reynier ;

Société d'Encouragement, séance du 22 avril 1881 : Conférence et expériences sur la pile Faure, par le même.

Digitized by Google

rable à la production du courant secondaire, et à la conservation de la charge produite.

« On abrège ainsi très notablement le temps de formation des couples secondaires, tout en leur conservant les qualités qui les rendent propres à de nombreuses applications. » (1)

Ce procédé n'a pas été pratiqué industriellement. M. Planté paraît l'avoir abandonné pour le suivant, qui est employé avec succès par plusieurs fabricants :

« Ce procédé consiste à soumettre simplement les couples secondaires à une sorte de décapage profond par l'acide azotique, étendu de moitié son volume d'eau, en les laissant immergés dans ce liquide pendant vingt-quatre à quarante-huit heures. Les couples sont ensuite vidés, lavés très complètement, remplis d'eau acidulée au dixième par l'acide sulfurique, et soumis à l'action du courant primaire. Par cette immersion dans l'acide nitrique, une portion du plomb se dissout sans doute, mais l'épaisseur des lames n'en est pas notablement diminuée, et, par suite de la porosité métallique, l'action chimique ne se borne pas seulement à la surface des lames de plomb ; elle s'exerce aussi à l'intérieur, crée de nouveaux intervalles moléculaires et facilite, en conséquence, la pénétration ultérieure de l'action électrolytique du courant primaire.

« Les couples secondaires ainsi traités peuvent fournir, en huit jours, après trois ou quatre changements de sens du courant primaire, des décharges de longue durée, alors que, sans l'action préalable de l'acide nitrique, ils ne pourraient donner qu'après plusieurs mois les mêmes résultats. » (2)

Capacité voltaïque. — La capacité voltaïque spécifique des accumulateurs Planté *bien formés* dépend de l'épaisseur des électrodes. Plus elles sont minces, plus la

(1) Gaston Planté, brevet 144101, du 25 juillet 1881.

(2) Gaston Planté. *Comptes rendus* de l'Académie des sciences, 28 août 1882.

Digitized by Google

capacité est grande, mais plus grande aussi est la fragilité des couples. Avec des lames de un millimètre d'épaisseur, qui ont une solidité suffisante, M. Planté obtient une capacité de 36 000 coulombs environ (10 ampères-heure) par kilogramme de plomb.

Constantes. — Dans les accumulateurs Planté et dans tous ceux du même genre, la force électromotrice *normale*, *utilisable*, est 1, 9 volt environ; mais elle est plus élevée dans les premiers instants qui suivent la charge, et surtout pendant la charge même.

Cette surélévation fugitive de la force électromotrice secondaire (1) croît avec l'intensité du courant de charge et avec la force électromotrice de la source; elle est causée par la présence de produits instables, qui se décomposent spontanément après l'interruption de la charge. Il ne reste ensuite que les corps stables : le plomb réduit, le plomb peroxydé et l'acide sulfurique, dont les réactions définies correspondent à la décharge normale, sous la chûte de potentiel de 1,9 volt.

La *résistance* intérieure des accumulateurs Planté est petite, à cause de la bonne conductibilité du liquide; elle est d'autant moindre que les lames de plomb ont une surface plus grande. La *formation*, quand elle ne dépasse pas certaines limites, diminue la résistance. Le rappro-

(1) Voir, p. 32.

Digitized by Google

chement des électrodes a une influence moins grande que le développement de leurs surfaces et leur degré de formation.

Un couple *formé* dont les électrodes, distantes de 5 millimètres, développent ensemble une surface de 50 décimètres carrés, a une résistance de 0,04 ohm à 0,06 ohm.

Cette faible résistance des accumulateurs Planté les rend aptes à fournir des courants plus intenses que les piles primaires les plus énergiques.

Formation autogène ; formation hétérogène. — Après l'étude des accumulateurs Planté vient la description des diverses *espèces* d'accumulateurs appartenant au même *genre*.

Ces espèces, déjà nombreuses, seront groupées en deux séries principales, d'après leurs procédés de *formation*. (On sait que la formation consiste à rendre accessible à l'électrolyse un certain poids de matières actives sur chaque électrode).

Dans les piles secondaires originales de Planté et dans celles qui en dérivent le plus directement, *les matières actives sont issues du métal même des électrodes :* ces accumulateurs rentrent dans la première série, et seront désignés *accumulateurs à formation autogène.*

Les autres espèces rentreront dans la deuxième série : celle des *accumulateurs à formation hétérogène.*

Digitized by Google

Digitized by Google

CHAPITRE IV

ACCUMULATEURS GENRE PLANTÉ

A FORMATION AUTOGÈNE

ACCUMULATEURS FORMÉS EN SURFACE. — ACCUMULATEURS A LAMELLES TRÈS MINCES : *Accumulateurs Tommasi; Accumulateurs de Kabath.* — ACCUMULATEURS A FILS DE PLOMB : *Accumulateurs Simmen; Accumulateurs Simmen et Reynier.* — ACCUMULATEURS A GRENAILLES DE PLOMB. — ACCUMULATEURS A ÉLECTRODES PLISSÉES. — LE FOISONNEMENT DE FORMATION. — LE FOISONNEMENT DE DÉCHARGE. — FOISONNEMENT BRUT. — FORMATION AUTOCÈNE RAPIDE COMPRIMÉE PAR LE FOISONNEMENT : *Accumulateurs Reynier.* — ELECTRODES RENDUES PERMÉABLES PAR L'ÉLIMINATION D'UN MÉTAL AUXILIAIRE : *Accumulateurs Denis Monnier.* — ACCUMULATEURS A ÉLECTRODES SULFURÉES.

Accumulateurs formés en surface. — Rendre accessible à l'électrolyse un certain poids de matières actives, tel est le but de la *formation.* On peut obtenir les poids nécessaires en développant beaucoup les surfaces des électrodes : une attaque peu profonde suffit alors pour procurer la masse exigée. C'est la *formation en surface*, réalisée dans les accumulateurs à *lamelles très minces*, à *fils de plomb*, à *grenailles de plomb.*

Digitized by Google

Accumulateurs à lamelles très minces. — 1 kilogr. de plomb, laminé à l'épaisseur de 1 millimètre, développe une surface de 18 décimètres carrés. La surface est inversement proportionnelle à l'épaisseur. Ainsi du plomb laminé à 1/10e de millimètre développe 180 décimètres carrés par kilogramme.

Sur ce principe sont basés les accumulateurs Tommasi et de Kabath.

Accumulateurs Tommasi (1). — Les électrodes des accumulateurs Tommasi sont des plaques de plomb verticales, épaisses de 2 millimètres environ, pourvues de cloisons transversales venues de fonte et inclinées à 30 ou 40 degrés. Les cloisons obliques de cette sorte d'étagère laissent entre elles des vides de 5 millimètres, qui sont garnis avec des lamelles de plomb de 1/10e de millim. environ.

La formation oxyde rapidement ces lamelles au pôle positif, et les convertit en masses spongieuses, que l'inclinaison des compartiments retient sur la plaque-support.

L'électrode positive se forme seule. Aussi faut-il changer, au moins une fois, le sens du courant de charge, pour former successivement les deux électrodes. Ces *retournements* sont indispensables dans tous les accumulateurs genre Planté à formation autogène.

(1) Brevet français, n° 143 555, du 3 septembre 1881, pris par la Société universelle d'électricité Tommasi; pour « *Perfectionnements dans les piles secondaires.* »

Digitized by Google

Accumulateurs de Kabath. — Dans les accumulateurs de Kabath, les électrodes sont constituées par des rubans de plomb très minces, superposés horizontalement dans une cage de plomb étroite (fig. 14) ; toutes ces bandes sont

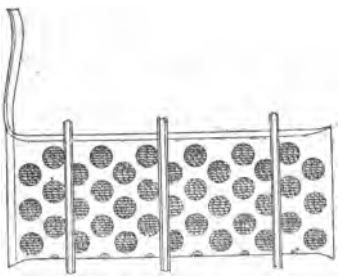


Figure 14.

mises en contact avec la cage par une compression énergique exercée sur les bords verticaux de cette boîte ajourée. Pour empêcher les rubans de se masquer entre eux, l'inventeur a pris soin d'en *onduler* un sur deux : d'où le nom d'accumulateurs *gaufrés*.

Le modèle le plus usité (fig. 15) pesait 30 kilogr., répartis ainsi :

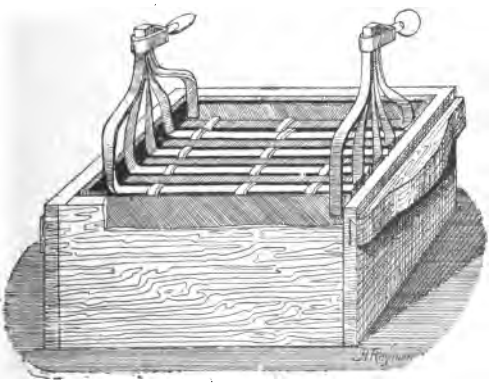


Figure 15.

Digitized by Google

10 électrodes positives et négatives	21 kg.
Eau acidulée sulfurique à 1/10e	6 —
Récipient en bois doublé d'ébonite.....	3 —

La *formation* s'opère par charges et décharges successives, avec quelques *retournements*. On accélère l'opération en ajoutant $\frac{1}{100}$ d'acide nitrique à la solution pendant les 200 premières heures.

Après 500 heures de formation, on obtient une capacité voltaïque de 12000 coulombs, ou 3,33 ampères-heure, par kilogramme de plomb.

Accumulateurs à fils de plomb. — Un kilogramme de plomb, tréfilé au diamètre de 1 millimètre, offre une surface de 35 décimètres carrés ; la surface développée par un poids donné de plomb tréfilé est en raison inverse du diamètre du fil.

Le premier accumulateur à fils de plomb avait pour électrodes des câbles (1) : dispositif offrant cet avantage que toutes les parties de l'électrode communiquent bien avec la prise extérieure de courant.

M. Tommasi (2) a enroulé des fils de plomb de 1 millimètre de diamètre sur des lames de plomb de 2 millimètres d'épaisseur.

(1) Emile Reynier, brevet français, n° 142 777, du 16 avril 1881, pris au profit de la Société « *La Force et la Lumière.* »

(2) Société Universelle d'Electricité Tommasi, brevet français, n° 143 101, du 10 août 1881, pour *Pile secondaire nouvelle.*

Digitized by Google

MM. Arnould et Tamine ont employé le fil de plomb de diverses manières : en hélices concentriques, en spirales plates, en bouts rectilignes soudés par leurs extrémités sur des chassis de plomb, etc.

Ces divers systèmes, incomplètement étudiés, avaient des défauts, dont le plus grave était la cherté du fil de plomb.

Accumulateur Simmen. — M. Simmen a fait disparaître cet obstacle en inventant un moyen aussi économique qu'ingénieux pour produire des fils de plomb de tous diamètres et de toutes longueurs.

Son procédé consiste à verser du plomb fondu dans un récipient préalablement chauffé, dont le fond est percé d'ajutages de dimensions et formes convenables. Le métal *file* en jets liquides à travers ces ajutages, et vient se solidifier brusquement dans un bassin rempli d'eau.

Le fil ainsi produit n'a pas la régularité du plomb tréfilé ; il est plus ou moins rugueux et ses brins s'emmêlent en des lacis inextricables, ce qui le rendrait impropre aux usages vulgaires ; mais il convient très bien à la construction des accumulateurs.

M. Simmen a donc fait des électrodes avec son fil. Ses premières plaques (fig. 16) se composaient d'une cage en plomb laminé remplie de plomb filé.

Cette cage, qui fait écran sur une grande partie du fil, restreint beaucoup l'avantage du grand développement de surface ; son prix de revient compense l'économie réalisée sur la fabrication des fils. Ces inconvénients de la boîte per-

Digitized by Google

forée ne sont pas rachetés par un accroissement de solidité ; car cette enveloppe se *forme* vite et se coupe infailliblement

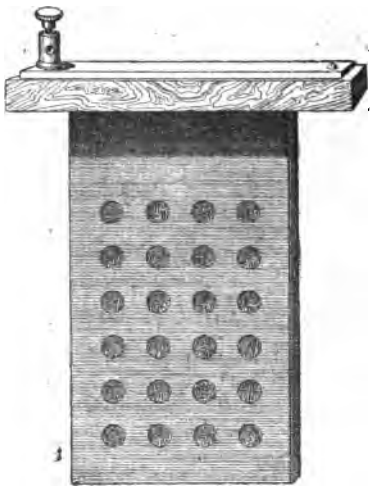


Figure 16.

vers le niveau du liquide, en laissant tomber l'amas fibreux dont elle est le support.

M. Simmen fut donc amené à abandonner cette fâcheuse réminiscence de l'accumulateur de Kabath. Aidé du concours d'un autre inventeur, il chercha un meilleur mode d'emploi de son fil, qui fournit économiquement du plomb très divisé.

Accumulateurs Simmen et Reynier (1). — La cage-support étant condamnée, il fallait trouver un moyen

(1) Brevet français, nº 168 155, du 8 Avril 1885, pour *Electrodes d'Accumulateurs en plomb*, par Emile Reynier et Adolphe Simmen.

Digitized by Google

d'agréger les fils de plomb. Le câblage et le bobinage n'étaient guère possibles avec les amas confus qu'il s'agissait d'utiliser. Mais une précieuse propriété de cette matière première s'est bientôt révélée par l'examen de quelques échantillons, et a fourni le moyen à employer.

Le fil Simmen n'est pas lisse. Examiné au microscope, il se montre composé d'une suite de larmes accolées bout à bout, d'une série d'articles irréguliers alternativement renflés et déprimés. Ces rugosités sont avantageuses ; elles augmentent la surface et rendent le fil propre au feutrage. Une poignée de brins, pétrie à la main puis aplatie au marteau, s'agglomère aussitôt en une masse *feutrée* d'une certaine solidité.

On a donc pensé que des amas fibreux, soumis dans des matrices résistantes à une compression énergique, donneraient des *feutres* tenaces. L'essai a bien réussi. Un paquet de fils, comprimé à la presse ou au balancier, devient une plaque solide et cependant perméable, possédant des millions de cellules.

La densité moyenne des flans dépend de la pression exercée sur eux. On a réglé cette densité à 8. Les feutres ont donc environ un tiers de vide. Malgré l'apparent désordre de ces amas de fils, que la compression écrase sans apprêt, les vides et les pleins se trouvent régulièrement répartis ; le hasard a ses lois.

La structure capillaire des feutres procure une *formation* rapide, une capacité voltaïque élevée et une bonne conductibilité interne. Ces propriétés peuvent d'ailleurs être exaltées

Digitized by Google

ou modérées au gré du constructeur : la solidité et la durée de l'électrode augmentent avec la grosseur du fil employé ; la rapidité de formation et la capacité voltaïque augmentent au contraire avec la ténuité des brins — d'où la possibilité de faire dominer les premières qualités ou les secondes, selon le besoin.

Habituellement, on donne 2/10 de millimètre au fil des plaques négatives et 5/10 à celui des positives.

Un cadre en plomb, pourvu d'appendices suspenseurs, est coulé autour du flan feutré ; il lui sert de support et de conducteur (fig. 17).

Fig. 17.

Voici quelques renseignements numériques sur un modèle de plaque feutrée qui a été mis en usage courant :

Largeur de la plaque.....	140	millimètres.
Hauteur totale.....	245	—
Epaisseur.....	4	—

Digitized by Google

Poids du feutre.....	700	grammes.
— total.....	1 300	—
Surface externe de l'électrode.....	5,4	décimèt. carrés.
— développée totale pour l'électrode positive.....	50	—
Surface développée totale pour l'électrode négative.....	125	—
Capacité voltaïqe par paire de plaques	17	ampères-heure.
— — par kilog. de feutre .	12	—
— — — de plaques	7,3	—

On peut obtenir des *feutres* d'une longueur indéfinie par l'emploi du laminoir. Les fils de plomb, sortant de la filière, tombent sur une table mobile sans fin qui les conduit entre des cylindres, où ils sont feutrés à l'épaisseur voulue. Ce procédé, plus expéditif que la compression en matrices, donne des feutres de plomb à bon marché, qui trouveront leur emploi dans la construction des grandes batteries secondaires.

Accumulateurs à grenailles de plomb. — 1 kilogramme de plomb, fractionné en sphères de 1 millimètre de diamètre, développe une surface de 52 décimètres carrés. La surface est en raison inverse du diamètre des sphères; on obtient aisément des grenailles d'un diamètre bien inférieur à 1 millimètre.

La grenaille fine développe donc une surface énorme; mais chacun de ses grains, si nombreux, ne participerait efficacement aux actions voltaïques qu'à la condition d'être mis en bonne communication électrique avec le pôle.

Digitized by Google

Le plomb en grenailles fines a été employé par M. d'Arsonval, au positif d'un couple secondaire qui sera décrit parmi les accumulateurs au sulfate de zinc.

Accumulateurs à Électrodes plissées. — Des bandes de plomb laminé, plissées en accordéon, constituent des électrodes d'accumulateur à grande surface, dont toutes les parties sont accessibles aux actions électrolytiques. Ce dispositif est à la fois plus simple et plus efficace que les lamelles étagées ou les bandes encagées.

Pour augmenter la solidité et la durée des électrodes plissées, Emile Reynier les a d'abord *renforcées* par des *ourlets ou nervures transversales au plissage*, faites sur la bande de plomb avant la confection des plis (fig. 18).

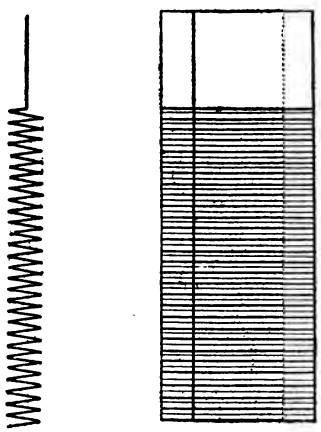


Figure 18.

Les zônes transversales ainsi renforcées relient les parties

Digitized by Google

de l'électrode rendues fragiles par la formation (1) ; des coupures survenues dans les parties simples ne peuvent plus amener la rupture de l'électrode.

Dans un ancien modèle de plaque assez connu, la feuille de plomb laminé, de 1/2 millimètre d'épaisseur, était d'abord triplée par deux pliages en long (fig. 19), puis

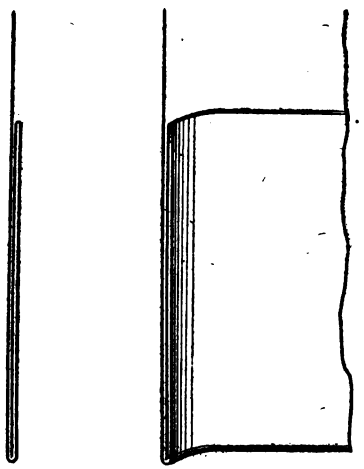


Figure 19.

plissée en travers. Les arêtes des plis verticaux étaient ensuite fendues sur la plus grande partie de leur hauteur, pour donner accès aux actions électrolytiques sur les surfaces internes du plissé (fig. 20).

Les fentes s'arrêtaient à deux ou trois centimètres des

(1) Brevet français, nº 153 915, du 23 février 1883, pour « *Perfectionnements aux Accumulateurs Electriques* ».

Digitized by Google

bords de la partie triplée, laissant deux zônes de renforcement.

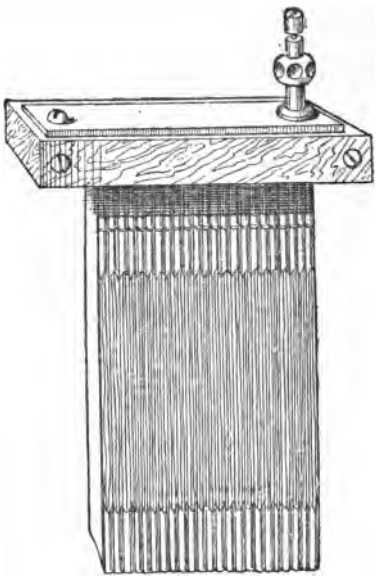


Figure 20.

La plaque était *suspendue* dans le liquide par une traverse fixée à sa partie supérieure, et reposant sur les bords du vase. Ce montage, qui a été imité par divers constructeurs, a l'avantage d'isoler les plaques des débris tombés dans le bas de l'appareil, et de diminuer la charge supportée par le fond du récipient.

Les électrodes plissées prennent, par la formation et par l'usage, un développement en éventail (fig. 21), dont la cause est un phénomène important, étudié par l'auteur et désigné par lui sous le nom de *foisonnement*. Ce phénomène, qu'il

Digitized by Google

faut maintenant expliquer, se produit dans tous les accumu-

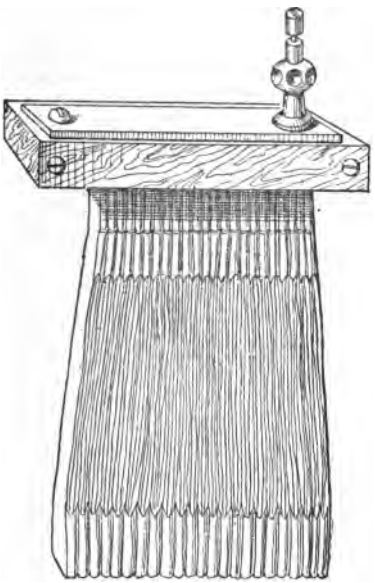


Figure 21.

lateurs du genre Planté ; mais il est le plus visible dans les plaques plissées, qui se distendent aisément.

Le foisonnement de formation (1). — Quand une lame de plomb ordinaire se *forme* en électrode positive d'accumulateur, son poids augmente et sa densité moyenne diminue.

(1) *Sur le Foisonnement du plomb dans les Accumulateurs*, par Emile Reynier : Société française de physique, séance du 20 mars 1885, et *L'Électricien* des 11 et 18 avril 1885.

Digitized by Google

En effet, une partie du plomb métallique devient peroxyde, en fixant de l'oxygène. 1 gramme de plomb donne 1,15 gr. de peroxyde. La densité de ce peroxyde n'est que 9,4, celle du plomb compact étant 11,4. Un volume de plomb donne donc $1 \times \frac{1,15 \times 11,4}{9,4} = 1,39$ volume de peroxyde.

Si la peroxydation atteint, par exemple, la moitié du plomb, l'expansion de l'ensemble est :

$$\frac{1 + 1,39}{2} = 1,19.$$

Le nombre 1,19, qui exprime le rapport entre le volume final et le volume primitif, est le coefficient de *foisonnement cubique de formation.*

En admettant que l'expansion soit égale en tous sens, l'expansion selon une seule dimension *(foisonnement linéaire)* est la racine cubique de l'expansion en volume :

Coefficient de foisonnement linéaire de formation $= \sqrt[3]{1,19} = 1,06.$

A cause de la plasticité des matières, le *foisonnement linéaire* n'est pas égal en tous sens; il est plus grand dans les directions où il rencontre moins de résistance. Le coefficient qui l'exprime n'est donc qu'une *moyenne.*

Quand on *réduit* un positif formé, pour en faire un négatif, son volume ne varie pas sensiblement. Les foisonnements de formation sont donc à peu près égaux pour les deux électrodes.

Le foisonnement de décharge. — La décharge d'un accumulateur produit, sur les deux électrodes, du

Digitized by Google

sulfate de plomb, plus lourd et moins dense que le peroxyde de plomb et le plomb spongieux : il en résulte une nouvelle augmentation du volume des plaques.

L'expansion des matières actives est calculée d'après les données ci-dessous :

1 partie de plomb donne..... 1,46 partie de sulfate de plomb,
1 — de peroxyde donne.. 1,27 — —

La densité du plomb *formé* (spongieux) est..... 8,2 (1)
— du peroxyde de plomb est..... 9,4
— du sulfate de plomb est..... 6,2

D'où :

$$\text{Expansion cubique au positif} = 1{,}27 \times \frac{9{,}4}{6{,}2} = 1{,}93$$

$$\text{— — au négatif} = 1{,}46 \times \frac{8{,}2}{6{,}2} = 1{,}93$$

La décharge *utilisable* s'arrête avant la sulfatation complète du plomb spongieux et du peroxyde, parce que le sulfate, qui n'est pas conducteur, augmente progressivement la résistance électrique des matières actives. La moitié seulement de ces matières peut être intéressée dans la décharge.

On a supposé tout à l'heure que la formation avait attaqué une moitié de chaque électrode; le *foisonnement de décharge* s'exerce donc, en définitive, sur un quart des poids totaux. En conséquence, ses coefficients sont :

$$\text{Coefficient de foisonnement cubique de décharge} = \frac{1{,}93 + 3}{4} = 1{,}23.$$

$$\text{— — linéaire de décharge} = \sqrt[3]{1{,}23} = 1{,}07.$$

(1) Variable, à cause de la plasticité de la matière.

Digitized by Google

Foisonnement brut. — Quand on recharge l'accumulateur, les matières actives *tendent* à reprendre le volume moins grand qu'elles avaient avant la décharge ; mais les supports en plomb métallique, qui sont fort peu élastiques, restent distendus — ce qui oblige les matières perméables à se déprimer, à *se creuser*, à devenir plus poreuses. La capacité voltaïque de l'accumulateur serait limitée par ce phénomène, si elle ne l'était, d'autre part, par la mauvaise conductibilité du sulfate.

Les supports restant distendus après la décharge, le foisonnement final, ou *foisonnement brut*, est le produit du foisonnement de formation par celui de décharge — soit, dans l'exemple suivi :

Coefficient de foisonnement brut cubique $= 1{,}19 \times 1{,}23 = 1{,}46$

— — — linéaire $= \sqrt[3]{1{,}46} = 1{,}134$

Ces foisonnements énormes sont calculés dans l'hypothèse d'un couple à formation autogène réalisant la capacité voltaïque limite prévue par la théorie (1) — soit environ 32 ampères-heure par kilogramme de plomb. Mais la plus grande capacité obtenue dans des accumulateurs à formation autogène, est 16 ampères-heure par kilogr. Pour ce chiffre, les foisonnements bruts, cubique et linéaire, sont respectivement 1,23 et 1,07.

D'après le calcul, les foisonnements bruts sont égaux dans les deux électrodes ; mais dans la pratique, il se

(1) Voir *Conséquences pratiques de la théorie chimique des accumulateurs*, dans l'ouvrage « Piles électriques et Accumulateurs ».

Digitized by Google

produit une expansion beaucoup plus grande à l'électrode positive, celle-ci prenant peu à peu une formation beaucoup plus profonde que la négative.

Les expansions de matières actives se produisent sur toutes les électrodes appartenant au genre Planté. Il faut donc en tenir compte dans la construction des accumulateurs. Ces phénomènes tendent à produire, sur les positifs surtout, des extensions, des gauchissements, des mouvements divers, qui amènent souvent des contacts internes et des ruptures de plaques.

Formation autogène rapide, comprimée par le foisonnement. — Par contre, le foisonnement a pu être *utilisé*, comme on va le voir, pour comprimer, agréger et retenir les matières formées.

Accumulateurs Reynier (1). — Les électrodes plissées, qui avaient mis en évidence l'importance du foisonnement, ont bénificié de l'étude qu'elles avaient provoquée.

L'inventeur a pensé qu'en limitant l'expansion latérale, il produirait une forte compression des matières superficielles contre les parois intérieures des plis — et que ces matières, ainsi pressées contre leur support conducteur,

(1) Addition au brevet 153 915, déjà cité ;
Électrodes d'accumulateurs à compression interne par foisonnement, dans « l'Électricien » du 10 octobre 1885.

Digitized by Google

entreraient mieux en activité. Il a obtenu en effet des capacités voltaïques plus élevées en liant entre eux les plis des électrodes par des soudures autogènes transversales; mais ces soudures sont difficiles, coûteuses et peu solides.

On a obtenu une réussite plus complète avec la nouvelle électrode à cadre fondu. La figure 22 montre cette plaque

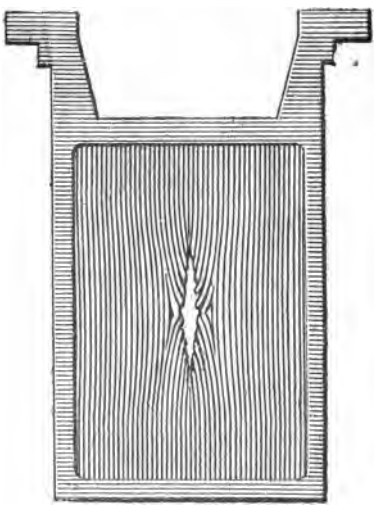


Figure 22.

avant la formation; la figure 23 la représente formée et foisonnée.

La partie active de l'électrode est constituée par une bande de plomb laminé de $0^m,65$ de longueur, $0^m,17$ de largeur et 1/2 millimètre d'épaisseur. Au milieu de cette bande est pratiqué un évidement en forme de losange: dia-

Digitized by Google

gonale en long $0^m,12$, diagonale en travers $0^m,11$. La feuille est ensuite plissée mécaniquement. Le losange central pro-

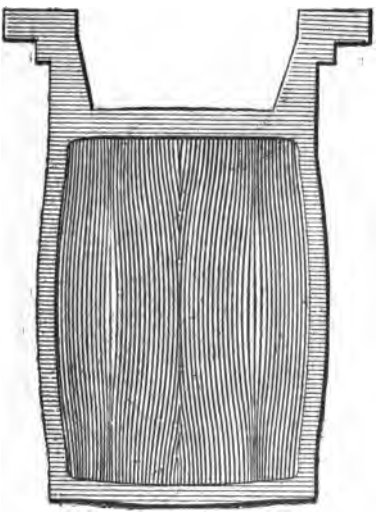


Figure 23.

duit, au milieu du plissé, un trou vers lequel les plis tendent à converger.

La plaque plissée est introduite dans un moule en fonte qui laisse autour d'elle un vide convenable; on verse dans le moule du pomb fondu qui remplit ce vide pour former le cadre, et se soude au panneau qu'il entoure. Deux appendices coudés, servant de supports et de conducteur à l'électrode, viennent de fonte avec le cadre et font corps avec lui.

Le cadre fondu est pour l'électrode un lien physique et

Digitized by Google

mécanique plus solide que les ourlets ou nervures des anciennes plaques. Il résiste au foisonnement transversal et procure une compression énergique des matières perméables superficielles, qui sont mises ainsi en contact intime et étendu avec les parties conductrices de la plaque.

La convergence des plis vers le trou central, s'accentue par la formation; cela soulage les milieux verticaux des cadres qui, sans l'évidement, prendraient une flèche trop accentuée.

Voici quelques renseignements sur la plaque la plus employée, dite plaque normale :

Largeur du cadre.....	140	millimètres.
Hauteur du cadre.....	200	—
Hauteur totale de la plaque.....	235	—
Epaisseur.....	5	—
Poids du plissé.....	600	grammes.
— total.....	1 200	—
Surface externe de l'électrode.....	5	décim. carr.
— développée totale.....	21	— —
Capacité voltaïque par paire de plaques	14	ampères-heure.

La capacité voltaïque du plissé est d'environ 12 ampères-heure par kilogramme; mais comme le cadre lui ajoute un poids mort égal au sien, la capacité de l'ensemble n'est que de 6 ampères-heure environ par kilogramme de plaques.

Pour obtenir une meilleure utilisation spécifique du plomb, il faut diminuer le poids relatif du cadre. C'est ce qui a été fait dans un autre modèle de plaque, dont voici les données :

Digitized by Google

Largeur du cadre	125	millimètres.
Hauteur du cadre	500	—
Hauteur totale de la plaque	570	—
Epaisseur	5	—
Poids du plissé	1 500	grammes.
— total	2 250	—
Surface externe de l'électrode	13	décim. carrés.
— développée totale	50	—
Capacité voltaïque par paire de plaques	36	ampères-heure.

Ici, la capacité voltaïque de l'ensemble atteint 8 ampères-heure par kilogramme de plaques.

La *formation* est faite par les procédés de M. Gaston Planté; elle est assez rapide, surtout si l'on attaque préalablement les plissés par l'acide nitrique, selon les indications du célèbre physicien (voir p. 55). La stucture de la nouvelle plaque permet de pousser l'opération très vite, car on n'a pas à craindre la chûte des matières superficielles, celles-ci étant fortement retenues par compression.

L'écartement des plis est réglé de telle manière que la densité moyenne de la partie active soit 6 à 6,5. La densité du plomb métallique compact étant 11,4, les plis laissent d'abord entre eux un certain jeu ; mais le foisonnement comble les vides, cimente les lamelles, et donne aux quatre côtés du cadre une convexité sensible, indice d'une forte compression interne (figure 23).

Les électrodes sont *suspendues*, portées par un cadre en bois verni posé sur le récipient ; à chacune d'elles est soudé un fil de nickel, serré par une vis dans le trou correspondant d'un collecteur en laiton nickelé.

Digitized by Google

L'isolement des plaques entre elles est assuré par des bagues verticales de caoutchouc, ou, mieux encore, par des fourches en bois (fig. 24) ou en ébonite.

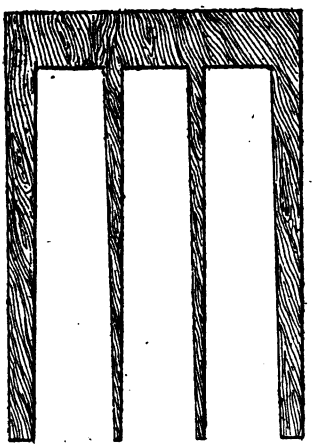


Figure 24.

Les accumulateurs comportent un nombre impair de plaques, de telle manière que la première et la dernière soient négatives.

Le petit modèle à cinq plaques normales (fig. 25) est monté dans un récipient de verre. Les modèles plus gros, à 9, à 13 ou à 27 plaques, ont des récipients de grès, enduits d'un vernis au bitume qui les rend imperméables à l'eau acidulée sulfurique. Tous ces accumulateurs sont entièrement démontables, de telle sorte qu'on peut retirer, examiner ou changer l'une quelconque de leurs pièces sans le secours d'un spécialiste.

Digitized by Google

Les grandes plaques de 2ᵏ, 250, montées de la même manière, donnent la série des accumulateurs profonds.

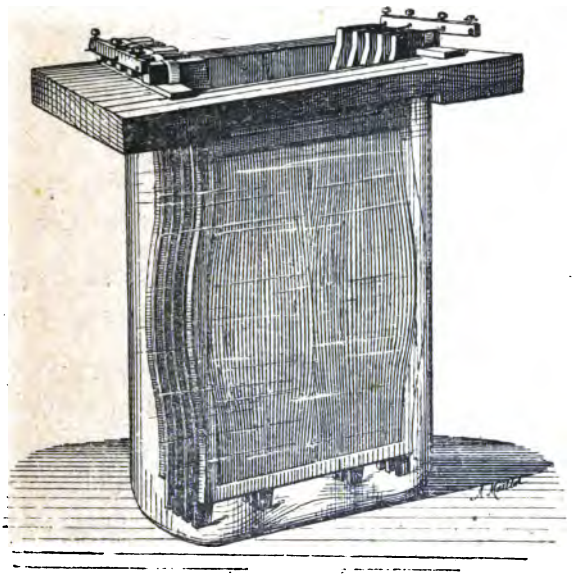


Figure 25.

Electrodes rendues perméables par l'élimination d'un métal auxiliaire. — On peut rendre perméables des plaques épaisses, en alliant au plomb un métal auxiliaire qu'on élimine ensuite.

Dans un brevet déjà cité (1), M. Tommasi revendique « l'emploi du métal spongieux produit par la décomposi- « tion électrique d'un alliage de plomb et d'étain. »

(1) N° 143 555, du 3 septembre 1881.

Digitized by Google

Un peu plus tard, MM. Fitz-Gérald, Crompton, Biggs et Beaumont (1) ont indiqué, dans le même but, des *alliages ou mélanges* du plomb avec d'autres métaux : zinc, sodium, antimoine, potassium, fer, cadmium, cuivre, argent, ou plusieurs de ces métaux. Les auteurs donnent comme exemples les alliages suivants :

2 à 4 parties	de plomb	avec	1 d'antimoine,
8	—	—	1 de zinc,
300	—	—	50 de zinc et 1 de sodium.

Ils ajoutent : « Nous n'employons l'étain dans aucun de « nos alliages, parce que nous avons trouvé qu'il ne peut « être éliminé qu'avec une grande difficulté — et que s'il « reste de l'étain lorsque les plaques forment les électrodes « d'une pile, il se dissout lentement, se dépose et produit « des faux contacts entre les électrodes. »

Ces auteurs n'ont pas fait connaître les résultats de leurs recherches.

Accumulateur Denis Monnier. — M. Denis Monnier paraît n'avoir pas eu connaissance des essais précédents (2) quand il a fait breveter (tardivement) ses électrodes en plomb allié (3).

(1) Brevet français, n° 149 200, du 25 mai 1882, pour *Perfectionnements dans les piles secondaires.*

(2) L'auteur de ce livre ignorait aussi ces antériorités lorsqu'il a décrit l'accumulateur Monnier devant la *Société des ingénieurs civils* (4 juillet 1884) et dans *Le Génie civil* (9 août 1884.)

(3) Denis Monnier, professeur à l'Ecole de chimie de Genève : Brevet français, n° 152 607, du 13 décembre 1882, pour « *Perfectionnements aux accumulateurs d'électricité.* »

Digitized by Google

M. Monnier a choisi le zinc comme métal auxiliaire, à la dose de 4 à 8 pour 100. Il n'y a alliage véritable que pour un centième de zinc ; le surplus n'est que mélangé. Ce mélange à chaud s'opère difficilement à cause de la différence de densité des deux métaux ; on l'obtient cependant à l'aide de certains tours de main.

Les électrodes sont des plaques de 3 millimètres d'épaisseur. Le zinc étant éliminé par des immersions réitérées dans des lessives caustiques et dans l'eau acidulée sulfurique, laisse des vides petits et nombreux qui rendent le plomb poreux, perméable dans toute son épaisseur aux actions électrolytiques. Cette préparation des électrodes n'est pas sans analogie avec les décapages profonds à l'acide nitrique préconisés par M. Planté.

L'élimination du zinc doit être complétée par la *formation*. Sous l'action du courant électrique, dont on change plusieurs fois le sens, les deux électrodes, tour à tour positives, livrent leurs dernières traces de zinc à l'état de sulfate de zinc, qui se dissout dans le liquide. Il faut renouveler souvent l'eau acidulée sulfurique; faute de ce soin, le zinc restant serait indéfiniment véhiculé d'une électrode à l'autre, et la formation ne pourrait s'achever.

Les décapages réitérés, les lavages nombreux et les *retournements* obligatoires avec renouvellement fréquent du liquide, rendent laborieuse et coûteuse la formation des plaques; mais le résultat obtenu vaut bien un peu de soins et de dépenses. Les électrodes Monnier, douées d'une capacité voltaïque assez élevée, sont compactes, homogènes et durables.

Digitized by Google

La rigidité des plaques a permis d'adopter un montage simple et solide, que montrent les figures 26 (coupe longitudinale) et 27 (coupe transversale selon AB).

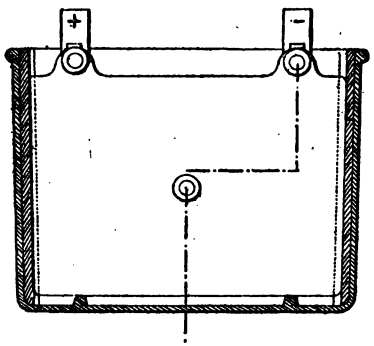


Figure 26.

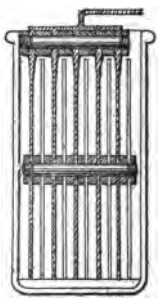


Figure 27.

L'accumulateur se compose d'un nombre pair de plaques semblables, alternativement positives et négatives, et très rapprochées. Chaque lame est pourvue d'une saillie émergeant du liquide ; les saillies positives sont orientées du même côté, et réunies par un boulon métallique ; les saillies négatives sont reliées de la même manière du côté opposé. Un boulon d'ébonite traverse et solidarise toutes les électrodes positives et négatives, avec interposition de rondelles isolantes. Cet ensemble compact repose sur deux barres transversales ; il est maintenu à chaque bout par deux panneaux en bois rainé, dans lesquels s'engagent les bords verticaux des plaques.

Le récipient est en grès.

Digitized by Google

Voici quelques chiffres relatifs à l'accumulateur à dix plaques :

Surface totale des 10 plaques.....	110	décim. carrés.
Poids de chaque plaque.....	1 k. 900	
— des 10 plaques.....	19 k.	
— du liquide (eau acidulée au 1/10).....	4 k.	
— du récipient.....	4 k.	
— total.....	29 k.	
Capacité voltaïque.....	144	ampères-heure.
Intensité du courant de décharge normal....	23	ampères.
— du courant de charge.....	13	ampères.

La capacité voltaïque spécifique est 7,6 ampères-heure par kilogrammes de plaques.

L'accumulateur Denis Monnier n'est pas exploité industriellement ; mais il pourrait l'être, car c'est un bon appareil.

Accumulateurs à électrodes sulfurées. — La sulfuration préalable des électrodes de plomb accélère leur formation. Ce procédé est attribué à M. Schulze.

Les plaques sont sulfurées, jusqu'à une certaine profondeur, par une addition de fleur de soufre qu'on chauffe à leur contact. On les *forme* par le procédé Planté. Le soufre, emporté par les gaz de l'électrolyse à l'état d'hydrogène sulfuré et d'acide sulfureux, laisse du plomb poreux à la surface des électrodes.

On n'a pas de renseignements sur les accumulateurs formés de cette manière.

Digitized by Google

Digitized by Google

CHAPITRE V

ACCUMULATEURS GENRE PLANTÉ

A FORMATION HÉTÉROGÈNE

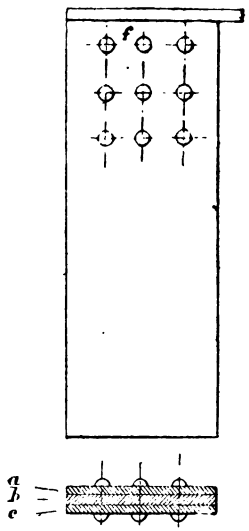
ACCUMULATEURS A OXYDES OU SELS INSOLUBLES DE PLOMB, JUXTAPOSÉS A DES SUPPORTS CONDUCTEURS, *système Camille Faure.* — ACCUMULATEURS A PLAQUES ALVÉOLÉES, REMPLIES DE PLOMB TRÈS DIVISÉ, *système Volckmar.* — ACCUMULATEURS A OXYDES ENCASTRÉS, *système Faure-Volckmar.* — GRILLAGES EN ALLIAGE DE PLOMB ET D'ANTIMOINE *de M. Sellon.* — ACCUMULATEURS FAURE-SELLON-VOLCKMAR. — MODIFICATIONS DIVERSES AUX ACCUMULATEURS FAURE-SELLON-VOLKCMAR : *Plaques doubles ; Modifications dans la composition du liquide, par M. Charles Philippart ; Montage en colonne de M. Gustave Philippart.* — ACCUMULATEUR MIXTE, SYSTÈME FAURÉ-REYNIER. — AMALGAMES JUXTAPOSÉS : *Accumulateurs Nézeraux.* — PLAQUES EN OXYDES DE PLOMB AGGLOMÉRÉS : *Métallodiums et métallodions de M. Aron ; Électrodes en peroxyde de plomb de M. Tribe ; Électrodes agglomérées de M. Frankland ; Accumulateurs à plaques agglomérées de M. René Tamine ; Lithanode de M. Fitz-Gérald.* — FORMATION ÉLECTROCHIMIQUE : *Accumulateurs de Montaud.*

Accumulateurs à oxydes ou sels insolubles de plomb juxtaposés à des supports conducteurs, *système Camille Faure.* — Des électrodes Planté bien *formées* se composent d'une âme en plomb métallique, recouverte d'une couche perméable, dont la partie active est du peroxyde sur les positives, et du plomb réduit sur les négatives.

Digitized by Google

La formation Planté produit ces matières perméables avec le plomb même des électrodes (formation autogène).

M. Camille Faure (1) a obtenu d'emblée des électrodes à couches actives épaisses, en appliquant sur des lames en plomb une pâte de sulfate ou d'oxydes de plomb, soutenue par un cloisonnement de feutre (fig. 28 et 29).



Figures 28 et 29.

Des électrodes ainsi préparées peuvent être formées par une seule charge d'environ 150 heures. La formation

(1) Brevet français, n° 139 258, du 20 octobre 1880, pour *Perfectionnements aux batteries galvaniques et applications de ces batteries aux machines locomotives électriques ;* brevet français, n° 141 057, du 9 février 1881, pour *Perfectionnements dans les dispositions et la construction des couples-batteries galvaniques secondaires.*

Digitized by Google

amène les masses pulvérulentes à l'état de croûtes solides, poreuses et conductrices de plomb réduit et de peroxyde de plomb, plus ou moins mélangés de sulfate de plomb.

Les accumulateurs Faure, comme ceux de Planté, se composent d'un nombre plus ou moins grand d'électrodes planes alternées, ou d'une seule paire d'électrodes roulées en spirale (figure 30).

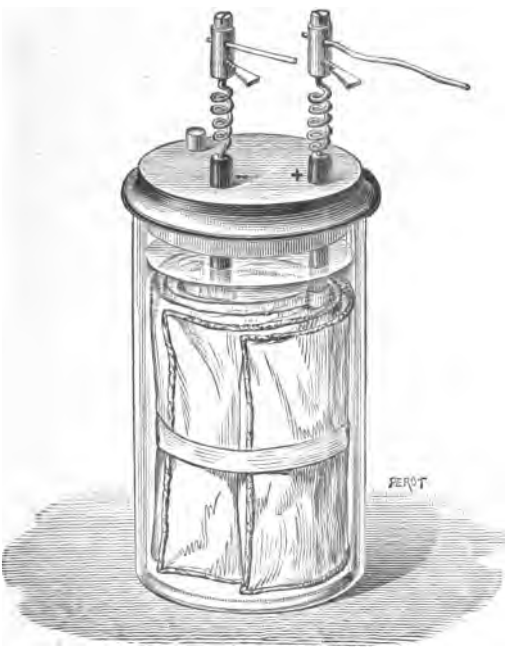


Figure 30.

Une Commission du Jury de l'*Exposition d'Electricité* de Paris (Janvier 1882) a fait sur les accumulateurs Faure une

Digitized by Google

série d'expériences dont les résultats ont été communiqués à l'*Académie des sciences* (1).

La batterie expérimentée se composait de 35 couples ronds, pesant chacun 43,7 kilogr. en moyenne ; les électrodes, couvertes de minium à raison de 10 kilogr. par mètre carré, pesaient environ 30 kilogr.

Les 35 accumulateurs, chargés en tension pendant 22 h. 45 m. avec un courant de 11 à 6,36 ampères, ont reçu 694 500 coulombs, sous une chute moyenne de 91 volts.

La décharge, qui a duré 10 h. 39 m. avec une intensité moyenne de 16,2 ampères et un potentiel moyen de 61,5 volts, a restitué 619 600 coulombs.

De ces données on tire :

Potentiel moyen de la charge pour 1 accumulateur	2,6	volts.
Chûte de potentiel utilisée à la décharge.....	1,76	—
Capacite voltaïque par kilogr. d'accumulateur.....	14 000	coulombs.
— — d'électrodes.....	20 653	—
Rapport entre les *quantités* restituée et reçue	0,89	—
Rapport entre les potentiels de décharge et de charge	0,675	—
Rendement électrique de la batterie : $0,89 \times 0,675 =$	0,60	—
Energie disponible par kilogr. d'accumulateurs.....	2 500	Kgm.
Poids d'accumulateurs nécessaire pour produire un cheval-heure électrique.....	108	Kgr.

Les résultats immédiats fournis par le système Faure ont vivement impressionné les électriciens ; ils ont donné, pour la première fois, une idée nette des services qu'on peut demander aux couples secondaires, lesquels ne s'étaient

(1) Note de MM. Allard, Joubert, Potier et Tresca, présentée à la séance du 6 Mars 1882.

Digitized by Google

révélés naguère que sous l'aspect d'appareils de laboratoire difficilement formés.

En même temps qu'il montrait ses remarquables qualités, l'accumulateur Faure laissait voir ses défauts, dont les principaux sont la brève durée des feutres, la désagrégation et la chûte des croûtes perméables, que le foisonnement séparait infailliblement de leurs supports.

On a dû abandonner le mode de soutien des matières actives par des cloisonnements de feutre. Mais le principe de la *formation hétérogène*, par apports d'oxydes, reste acquis; il est la base du système d'accumulateurs le plus employé maintenant dans l'industrie, le système Faure-Sellon-Volckmar, qui sera décrit un peu plus loin.

Accumulateurs à plaques alvéolées, remplies de plomb très divisé, système Volckmar. — M. Gustave Philippart a cherché à éviter l'inconvénient des cloisonnements, tout en conservant les avantages de la formation hétérogène. Il y a réussi par l'emploi de plaques épaisses, percées de trous, cellules ou alvéoles contenant les matières actives. Ce dispositif ingénieux a été breveté au nom de M. Ernest Volckmar (1).

M. Gustave Philippart fabriquait ses premières plaques en plomb laminé de 3 à 4 millimètres, ajouré mécaniquement; les trous, nombreux et très rapprochés, étaient garnis

(1) Brevet français, nº 145 218, du 8 octobre 1881, pris au nom de M. Ernest Volkmar, pour un *Nouveau système de piles secondaires.*

Digitized by Google

de plomb très divisé, en lamelles minces, en fils ténus, ou mieux encore à l'état de précipité chimique ou mousse de plomb (1).

Le plomb divisé en fils ou en lames réclamait une formation longue; la mousse de plomb, au contraire, se forme assez vite : après 150 à 200 heures de charge, les plaques qui en étaient garnies acquéraient une grande capacité voltaïque.

Pour obtenir le plomb à l'état de mousse, on le précipitait, par le zinc, de sa solution nitrique ou acétique. La matière première ainsi produite était fort coûteuse, et d'un emploi moins commode que les oxydes de plomb.

Accumulateurs à oxydes encastrés, *système Faure-Volckmar.* — En garnissant les cellules de Volckmar avec les pâtes de Faure, on a obtenu des électrodes exemptes des défauts reprochés à chacun des deux systèmes primitifs.

Les plaques alvéolées, qui supportent les matières actives, sont des grilles de plomb, aussi légères que possible, fondues dans des moules en fonte (fig. 31). La dépouille nécessaire au démoulage est prise par moitié de part et d'autre de la plaque; il en résulte que chacune des alvéoles est formée de deux troncs de pyramide accolés par leurs petites bases, les grandes bases affleurant les plans extérieurs de la plaque.

(1) L'emploi de la mousse de plomb dans les accumulateurs avait été indiqué déjà dans le brevet Tommasi, n° 143 555, du 3 septembre 1881, cité au chapitre précédent.

Digitized by Google

Les blocs de matières actives encastrés dans ces cellules évasées, sont retenus par leur milieu, et *rivés* pour ainsi dire dans la grille-support.

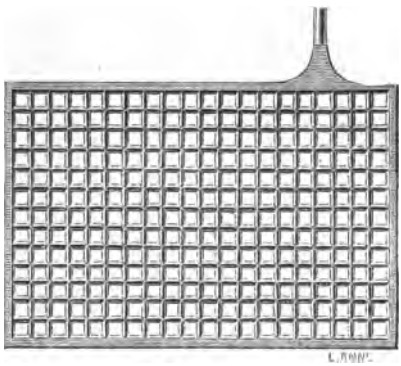


Figure 31.

La plaque garnie (fig. 32) met les matières actives en contact avec le liquide sur la presque totalité de ses surfaces ; car les arêtes des grillages, réduites au minimum, n'affleurent extérieurement que par des lignes étroites.

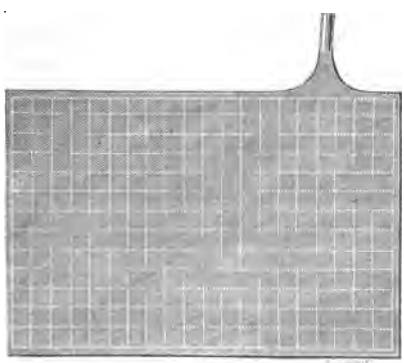


Figure 32.

Digitized by Google

Les pâtes qui garnissent les cellules se composent d'oxydes de plomb gâchés ferme dans de l'eau acidulée sulfurique. On emploie du minium pour les plaques positives et de la litharge pour les négatives. Le gâchage produit une petite quantité de sulfate de plomb en solution sursaturée ; pendant le séchage, le sulfate se solidifie lentement dans la masse, qu'il agglomère et durcit. La *prise* de la pâte s'opère comme celle d'un mortier, et par des phénomènes chimico-physiques analogues.

La *formation* ne produit pas de *foisonnement* sensible ; car la densité des pâtes est telle que leur conversion en plomb réduit et en peroxyde s'opère sans expansion ni retrait. Cet heureux accord, que les inventeurs ont obtenu sans l'avoir cherché (1), assure la réussite de la formation hétérogène dans les accumulateurs Faure-Volckmar.

Quant aux foisonnements de décharge, ils sont fractionnés ici en de nombreuses portions ; les expansions produites dans chaque cellule ne dépassent pas les facultés plastiques des matières actives.

En fait, les électrodes négatives ont une durée très grande (on a été jusqu'à dire indéfinie).

Les positives, au contraire, périssent au bout d'un certain temps, par une *formation* destructive du grillage, dont le métal se peroxyde de plus en plus. Le support ainsi attaqué *foisonne*, s'étend jusqu'à rompre, gauchit, se met parfois en

(1) L'étude des foisonnements est postérieure à l'invention Faure-Volckmar.

Digitized by Google

contact avec les plaques négatives, finit par abandonner les matières actives qu'il contenait. Ces accidents nécessitent des réparations et un renouvellement fréquent des plaques positives.

Grillages en alliage de plomb et d'antimoine *de M. Sellon.* — On retarde considérablement la formation destructive des grillages positifs en les fabricant en alliage de plomb et d'antimoine (1).

Ces alliages sont plus durs que le plomb; ils possèdent une propriété d'expansion au refroidissement qui donne aux pièces moulées une grande netteté. Pour ces motifs l'antimoine, indispensable dans les grillages positifs, est introduit aussi, en proportion moindre, dans les négatifs, dont il augmente la rigidité.

Accumulateurs Faure-Sellon-Volckmar. — Les alliages de plomb et d'antimoine employés par M. Sellon, dans la construction des accumulateurs Faure-Volckmar, a, dans une certaine mesure, donné à ces appareils la solidité et la durée qui leur manquaient. Les couples ainsi perfectionnés sont désignés « accumulateurs Faure-Sellon-Volckmar ».

Il en existe de nombreux modèles, qui diffèrent par le format, l'épaisseur et le nombre des plaques. La figure 33

(1) John Scudamore Sellon : Patente anglaise A D, 1881, 15 th september, n° 3 987, *secondary batteries or magazines of electricity;* brevet français, n° 147 831, du 10 mars 1882, pour *Perfectionnements aux piles secondaires ou accumulateurs d'électricité.*

Digitized by Google

montre un spécimen de fabrication française, monté dans un récipient en bois intérieurement garni de plomb. La figure 34 fait voir une de ses électrodes, dont le grillage est représenté en coupe et en élévation, figures 35 et 36.

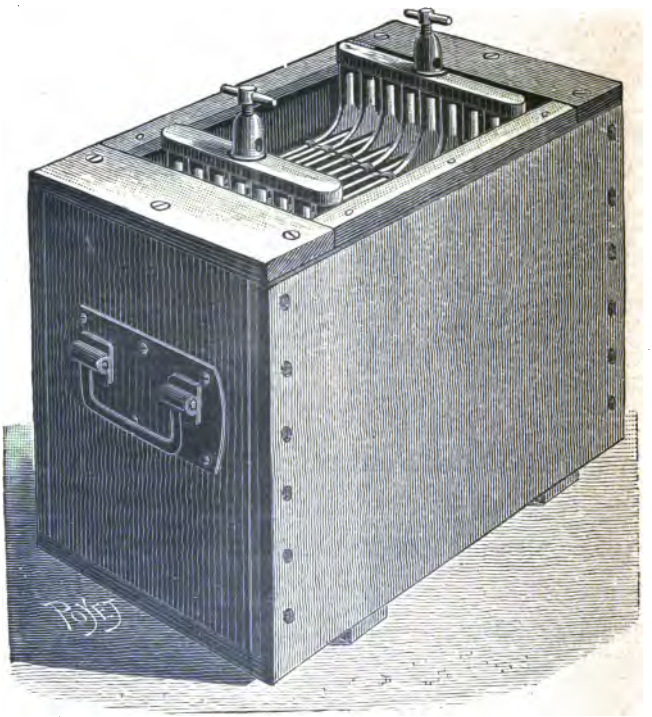


Figure 33.

Le spécimen de la figure 33 est un modèle relativement lourd, destiné aux éclairages à poste fixe; on construit des types plus légers pour la traction sur tramways. Les chif-

Digitized by Google

fres relatifs à deux modèles respectivement choisis parmi les types *éclairage* et *traction*, sont donnés en tableaux pages 99 et 100.

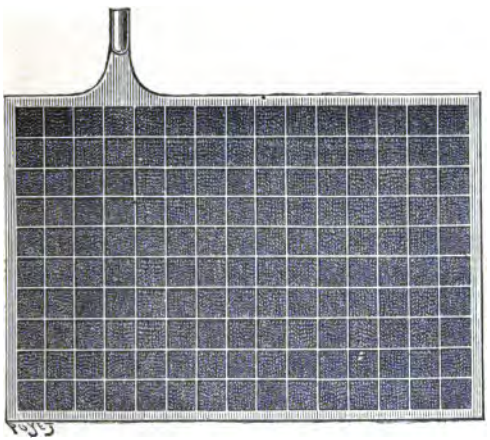


Figure 34.

On a ajouté, à titre de renseignement, un troisième tableau page 101 concernant un couple très léger, dont

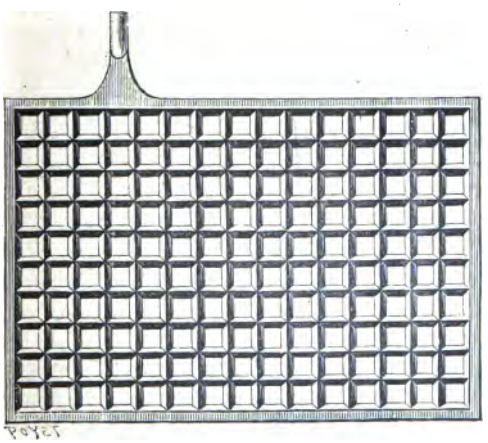


Figure 35.

Figure 36.

Digitized by Google

l'exemplaire unique a été construit par M. Gustave Philippart, dans le but de rechercher les limites inférieures qu'on pourrait atteindre, quant aux poids de plaques et d'accumulateur rapportés à la puissance et au travail. Les grillages n'ont que 2 millimètres d'épaisseur; ils sont allégés au point de recevoir un poids de matières égal au leur.

Ces plaques coûteuses et délicates donnent des résultats surprenants; mais leur fabrication et leur emploi exigeraient des soins incompatibles avec les errements actuels de la pratique industrielle.

Digitized by Google

ACCUMULATEUR FAURE-SELLON-VOLCKMAR

MODÈLE POUR ÉCLAIRAGE A PORTE FIXE

Récipient Bois et Plomb (Figure 33)

Dimensions des plaques	Longueur.	0m,310
	Hauteur...	0m,215
	Epaisseur.	0m,005
Nombre de plaques positives		8
— — négatives		9
Surface utile des 17 plaques		208 décim. carr.
Poids de chaque plaque		2,350 kilog.
— des 17 plaques		40 kilogr.
Dimensions extérieures de l'accumr.	Longueur.	0m,400
	Largeur...	0m,200
	Hauteur...	0m,380
Poids de l'accumulateur complet avec son liquide		60 kilogr.
Intensité du courant de charge		40 ampères.
— — de décharge		60 —
Capacité voltaïque		400 ampères-heure.
Puissance normale utile		108 watts.
Travail total utilisable		0,97 chev.-heure.
Régime de décharge par décim. carré de plaques.		0,29 ampère.
— — par kilogr. de plaques		1,5 —
Capacité voltaïque par kilogr. de plaques		10 ampères-heure.
— — de matières perméables		30 —
Poids d'accumulateur correspondant à la puissance de 1 cheval-vapeur		408 kilogr.
Poids de plaques correspondant à la puissance de 1 cheval-vapeur		272 —
Poids d'accumulateurs correspondant au travail électrique de 1 cheval-heure		62 —
Poids de plaques correspondant au travail électrique de 1 cheval-heure		41 —

Digitized by Google

ACCUMULATEUR FAURE-SELLON-VOLCKMAR

MODÈLE POUR TRACTION SUR TRAMWAYS

Récipient ébonite.

Dimensions des plaques.....	Longueur.	0m,150
	Hauteur...	0m,150
	Epaisseur.	0m,004
Nombre de plaques positives		8
— — négatives.....		9
Surface utile des 17 plaques		72 décim. carr.
Poids de chaque plaque.....		0,600 kilogr.
— des 17 plaques		10,2 —
Dimensions extérieures de l'acteur.	Longueur.	0m,170
	Largeur...	0m,130
	Hauteur...	0m,230
Poids de l'accumulateur complet, avec son liquide		13 kilogr.
Intensité du courant de charge.....		10 ampères.
— — de décharge		20 —
Capacité voltaïque		120 ampères-heure.
Puissance normale utile.....		36 watts.
Travail total utilisable.....		0,3 cheval-heure.
Régime de décharge par décim. carré de plaques.		0,28 ampère.
— — par kilogr. de plaques		2 —
Capacité voltaïque par kilogr. de plaques.....		12 ampères-heure.
— — de matières perméables		36 —
Poids d'accumulateur correspondant à la puissance de 1 cheval-vapeur.....		260 kilogr.
Poids de plaques correspondant à la puissance de 1 cheval-vapeur.....		204 —
Poids d'accumulateur correspondant au travail électrique de 1 cheval-heure.....		43 —
Poids de plaques correspondant au travail électrique de 1 cheval-heure		34 —

Digitized by Google

ACCUMULATEUR FAURE-SELLON-VOLCKMAR

MODÈLE D'EXPÉRIENCE, A PLAQUES MINCES

Récipient ébonite.

Dimensions des plaques.....	Longueur.	$0^m,150$
	Hauteur...	$0^m,150$
	Epaisseur.	$0^m,002$
Nombre de plaques positives.....		12
— — négatives.....		13
Surface utile des 25 plaques.....		108 décim. carr.
Poids de chaque plaque.....		0,245 kilogr.
— des 25 plaques.....		6,125 —
Dimensions extérieures de l'acc^{teur}.	Longueur.	$0^m,170$
	Largeur...	$0^m,130$
	Hauteur...	$0^m,230$
Poids de l'accumulateur complet avec son liquide.		9,700 kilogr.
Intensité normale du courant de charge.....		10 ampères.
— — de décharge.....		20 —
Capacité voltaïque.....		155 ampères-heure.
Puissance normale utile.....		36 watts.
Travail total utilisable.....		0,38 chev.-heure.
Régime de décharge par décim. carré de plaques.		0,186 ampère.
— — par kilogr. de plaques.....		3,25 —
Capacité voltaïque par kilogr. de plaques.....		25 ampères-heure.
— — de matières perméables		50 —
Poids d'accumulateur correspondant à la puissance de 1 cheval-vapeur.....		200 kilogr.
Poids de plaques correspondant à la puissance de 1 cheval-vapeur.....		125 —
Poids d'accumulateur correspondant au travail électrique de 1 cheval-heure.....		25,500 kilogr.
Poids de plaques correspondant au travail électrique de 1 cheval-heure.....		16,120 —

Digitized by Google

La fabrication anglaise des accumulateurs Faure-Sellon-Volckmar, monopolisée par la célèbre *Electrical Power Storage C°*, offre une grande variété de modèles. La figure 37 montre l'un de ses types.

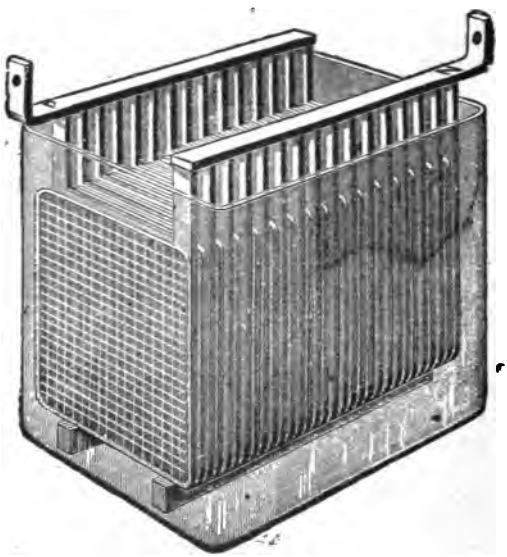


Figure 37.

Les récipients de verre, employés par la Compagnie E. P. S. pour la plupart des accumulateurs à poste fixe, sont, paraît-il, moins fragiles qu'ils n'en ont l'air; ils cassent rarement, isolent bien et facilitent l'inspection des couples.

L'*E. P. S. C°* fait ses plaques positives un peu plus épaisses que les négatives. A part ce détail de construction et l'agencement particulier de certains modèles, la fabrication

Digitized by Google

anglaise diffère peu de la française et donne des résultats équivalents.

Les accumulateurs Faure-Sellon-Volckmar fabriqués en Belgique, en Autriche et en Amérique, n'offrent aucune particularité qui mérite d'être rapportée.

Modifications diverses aux Accumulateurs Faure-Sellon-Volckmar. — On a proposé de nombreux perfectionnements au système Faure-Sellon-Volckmar ; parmi ces modifications plus ou moins heureuses, il y en a quelques-unes qui doivent être signalées.

Plaques doubles. — Dans les débuts de l'exploitation industrielle des accumulateurs, il arrivait souvent que les matières actives se détachaient de leurs supports, dans les plaques positives surtout. Ces accidents provenaient d'une mauvaise fabrication et des fautes commises dans la manipulation et l'usage des batteries.

On a cru empêcher la chûte des pastilles en enfermant les matières actives dans des cellules *rétrécies vers l'extérieur*. Dans ce but, on a fondu des grilles à une seule dépouille, et l'on en a pris deux, rivées ensemble, pour constituer une plaque. Les dépouilles des deux pièces accolées étaient opposées l'une à l'autre et tournées vers l'intérieur de la plaque, de manière à former des cellules renflées en leur milieu.

Digitized by Google

Ces plaques doubles (fig. 38, coupe transversale, fig. 39, vue de face), d'une fabrication compliquée, ont un poids

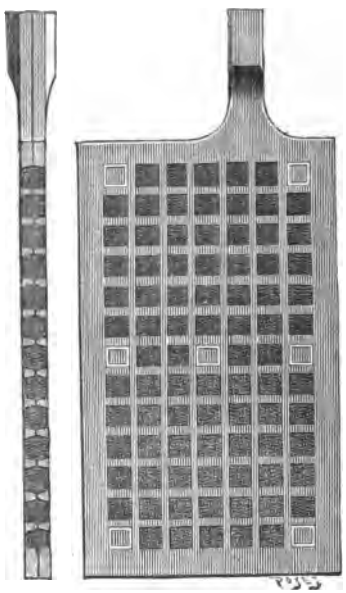


Figure 38. Figure 39.

mort plus grand que les simples ; les matières actives qu'elles contiennent ne sont accessibles au liquide que par des surfaces restreintes : d'où diminution de la capacité voltaïque, accroissement de la résistance intérieure et abaissement des régimes de charge et de décharge.

Ces graves défauts ne sont pas rachetés par une tenue meilleure des matières actives, dont la chûte semble, au contraire, être accélérée.

L'essai des plaques doubles a été fait en 1883 et 1884,

Digitized by Google

dans une grande batterie d'accumulateurs installée à l'Hôtel des Postes ; les résultats ont été mauvais.

Modifications dans la composition du liquide, par M. Charles Philippart. — Certaines applications, telles que la traction des voitures et la propulsion des bateaux, réclament une puissance électrique très grande avec un poids total restreint ; le débit normal des accumulateurs ordinaires est alors insuffisant. Il faudrait pouvoir l'augmenter sans diminuer l'épaisseur des plaques, qui doivent conserver toute leur solidité.

Dans ce but, M. Charles Philippart a expérimenté avec succès l'addition de l'eau oxygénée dans le liquide des couples (1). Cette modification a procuré une amélioration du régime de débit, qui peut être élevé jusqu'à 4 ampères par kilogramme de plaques *ordinaires*. En outre, la chûte de potentiel extérieure s'est trouvée accrue de 0,1 à 0,2 volt, et la capacité voltaïque utilisable notablement augmentée.

M. Charles Philippart comptait d'abord sur l'action oxydante du bioxyde d'hydrogène ; mais il a vu bientôt que les résultats obtenus devaient être expliqués par d'autres causes. En effet, le liquide conserve longtemps ses propriétés et peut fournir de nombreuses décharges intenses, sans renouvellement de l'eau oxygénée, ce qui rend inadmissible la désoxydation électrolytique de cet

(1) Brevet français, n° 159 933, du 25 janvier 1884, pour *Nouveau système pour dépolariser les piles secondaires*, par Charles Philippart.

Digitized by Google

adjuvant. L'inventeur attribue maintenant l'action plus énergique du liquide à un sulfate (ou polysulfate ?) de bioxyde d'hydrogène. Ce sulfate de bioxyde céderait de l'acide sulfurique dans un état particulier et doué d'affinités plus grandes que celui tiré du sulfate de protoxyde. Le bioxyde d'hydrogène libéré serait resulfaté au fur et à mesure de sa désulfatation, demeurant apte ainsi à véhiculer électrolytiquement une quantité indéfinie d'acide sulfurique.

Cette théorie semble confirmée par des expériences récentes. M. Charles Philippart a constaté que l'addition, dans l'eau acidulée sulfurique, de certains sulfates non oxydants, produit les mêmes effets qu'une addition d'eau oxygénée. Le sulfate d'ammoniaque, notamment, fournit des résultats remarquables.

Les décharges amplifiées obtenues avec les nouveaux liquides produisent nécessairement une augmentation du foisonnement de décharge, qui tend à pousser les matières actives hors des alvéoles. Il faudrait modifier la construction des plaques pour les rendre susceptibles de subir, sans dégradation, des expansions plus grandes. Cette question est à l'étude.

Montagne en colonne de M. Gustave Philippart. — Une pile secondaire de quelque importance comporte des centaines de pièces : récipients, électrodes, isolants, collecteurs, jonctions..... Cet ensemble, il faut l'avouer, est coûteux, encombrant, d'un transport et d'un maniement difficiles.

Digitized by Google

Dès le début de ses recherches, M. Faure avait tenté de simplifier les batteries secondaires par la construction d'accumulateurs multiples à électrodes parallèles, analogues aux piles à auges (1). Cette idée a été reprise par plusieurs autres inventeurs ; aucun n'a réussi à obtenir l'étanchéité parfaite des compartiments de l'auge et le bon isolement des couples juxtaposés.

M. Gustave Philippart donne aux accumulateurs multiples une disposition qui semble plus facile à réaliser (2). Il fait des électrodes doubles, coniques ou tronc-coniques, positives sur une face et négative sur l'autre ; ces cônes sont emboîtés les uns dans les autres, en pile verticale, avec interposition de cales isolantes. Le liquide est introduit dans les capacités étanches comprises entre deux cônes voisins. La batterie comporte autant de couples qu'il y a de cônes, moins un.

Les cônes sont constitués par une âme fondue, en alliage de plomb et d'antimoine, recouverte sur ses deux faces d'une pâte d'oxydes de plomb. Des sillons ou rainures, venues de fonte, forment des cellules qui retiennent les matières actives.

Pour rendre le système pratique, il faut obtenir des cônes fondus à cellules, de grandes dimensions, pas trop lourds et parfaitement sains ; les difficultés de cette fabrication ne paraissent pas insurmontables.

(1) Brevet français, n° 139 258, du 20 octobre 1880, déjà cité.

(2) Brevet français, n° 157 139, du 21 août 1883, pour *Construction nouvelle des accumulateurs électriques*, par Gustave Philippart.

Digitized by Google

Accumulateur mixte, *système Faure-Reynier.* — Avant de quitter les accumulateurs à oxydes, on citera cette combinaison d'un négatif Faure avec un *positif* plissé *à formation autogène.*

Le système a été établi, par l'auteur de ce livre, dans les ateliers de la *Société génevoise de constructions mécaniques.*

Le récipient de l'accumulateur (fig. 40) est une auge

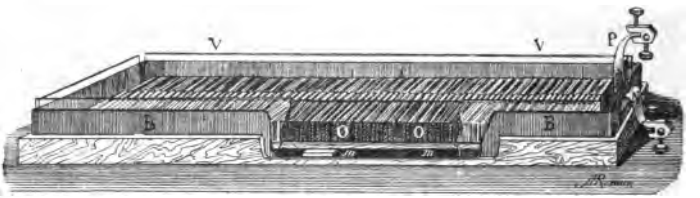


Figure 40.

rectangulaire, formée d'une feuille de plomb laminé dont les bords sont relevés sans soudure ; elle est soutenue par une caisse de bois AA, à bords très bas. L'auge de plomb, dont le fond est recouvert de minium *m m*, constitue l'électrode négative de l'accumulateur. Une bande de cuivre N y est soudée extérieurement pour recevoir la presse de contact.

L'électrode positive (fig. 42) est constituée par une longue bande de plomb, plissée et fendue selon tous ses plis, de manière à offrir sa surface presque entière à l'action électrolytique. Pour éviter qu'une formation profonde ne vienne couper cette électrode en une partie quelconque de sa longueur, on l'a renforcée en son milieu au moyen de deux

Digitized by Google

plis superposés (fig. 41), *e f* venant se placer sur *c d* et *g h* sous *a b*. Après ce double pliage *en long*, la bande est plissée *en travers;* puis tous les plis transversaux sont fendus depuis l'arête médiane jusqu'au bord. Un des bouts

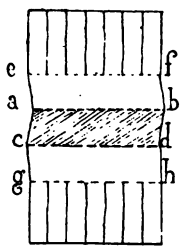


Figure 41.

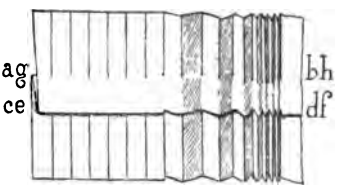


Figure 42.

de l'électrode émerge du liquide; à cette partie est soudée une bande souple de plomb sur laquelle est fixée la presse P.

Les deux électrodes sont séparées l'une de l'autre latéralement par des lames de verre VVV, et au fond par 3 tasseaux longitudinaux solidarisés par 3 semelles transversales.

Les accumulateurs sont superposés en étagères (fig. 43) et reliés entre eux de la manière ordinaire.

Ce modèle est économique de fabrication et d'entretien : il ne comporte que du plomb, du minium, du bois et de l'acide sulfurique; la main-d'œuvre y est réduite à peu de chose et le renouvellement du positif y est aussi facile que peu dispendieux.

Soixante de ces couples ont servi pendant plusieurs mois à l'éclairage des *Bouffes* de Genève (1).

(1) Mars 1883.

Digitized by Google

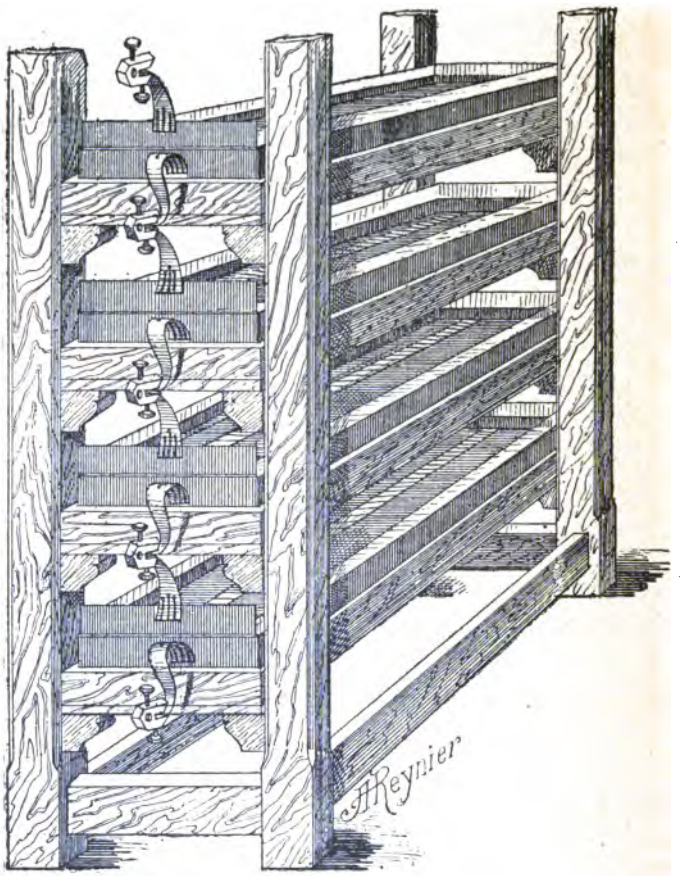


Figure 43.

Amalgames juxtaposés : *Accumulateurs Nézeraux* (1). — La partie active des plaques Nézeraux est

(1) Journal *La lumière électrique*, numéros des 23 et 30 mai 1885.

Digitized by Google

une masse de plomb spongieux obtenue par l'élimination du mercure dans un alliage mercure et plomb.

Cet amalgame contient une partie de mercure pour deux parties de plomb; il est combiné par fusion dans une marmite en fer. On le laisse cristalliser par refroidissement, puis on le réduit en poudre fine.

L'âme de l'électrode est une grille pourvue d'un encadrement en saillie. L'amalgame pulvérulent est appliqué sur les deux faces du grillage, qu'il recouvre entièrement, jusqu'à l'affleurement des bords saillants; on l'agglomère par pression. L'immersion dans l'eau acidulée sulfurique et une exposition à l'air achèvent de lier la masse et lui donnent de la cohésion.

Les plaques ainsi préparées sont soumises au courant de formation, qui peroxyde les positives en éliminant leur mercure. On fait une seconde charge en sens inverse : les négatives, devenant positives, se peroxydent à leur tour, tandis que les ex-positives, devenues négatives, passent à l'état de métal réduit très perméable. Le mercure éliminé est recueilli au fond des récipients de formation.

D'après l'inventeur, les plaques de ce système auraient une solidité et une durée très grandes. Elles pourraient donner jusqu'à 25 ampères-heure par kilogramme, cette capacité élevée provenant de la forte proportion de matières perméables, qui constitueraient les trois quarts du poids des plaques. Les régimes de charge et de décharge pourraient varier de 1/2 à 3 ampères par kilogramme ; enfin, la force

Digitized by Google

électromotrice des couples serait un peu plus élevée que celle des autres systèmes appartenant au genre Planté.

Les accumulateurs Nézeraux n'ayant pas été mis en exploitation, on n'en peut parler que d'après l'inventeur. A priori, les plaques à amalgames juxtaposés paraissent devoir être coûteuses, à cause des pertes de mercure ; la manipulation de ce métal en grandes masses serait bien plus insalubre que celle des oxydes de plomb.

Plaques en oxydes de plomb agglomérés. — Dans le système Faure, première tentative industrielle de formation hétérogène, les matières actives, peu cohérentes et surtout peu adhérentes, sont retenues contre leurs supports par des cloisonnements perméables. Les plaques alvéolées, qui constituent un progrès important, retiennent les matières sans le secours d'une cloison ; leur défaut est dans le poids trop grand du grillage, qui constitue les deux tiers du poids total. Les plaques Nézeraux marquent une tendance à diminuer le poids mort, en faisant dominer le poids de la masse perméable.

Dans les systèmes qui vont être cités, on a cherché à diminuer plus encore le support conducteur au profit des matières actives, en agglomérant celles-ci pour leur donner une cohésion propre et une plus grande conductibilité interne.

Digitized by Google

Métallodiums et Métallodions de M. Aron (1). — Le docteur H. Aron, de Berlin, désigne sous le nom de *métallodions* des oxydes métalliques agglomérés par le collodion sur des supports conducteurs en plomb ou en charbon. Les métallodions de peroxyde de plomb et de peroxyde de manganèse peuvent servir d'électrodes positives dans des piles primaires.

Les *métallodiums* sont des agglomérés métalliques perméables, obtenus indirectement par la réduction électrolytique des métallodions, ou directement par agglomération de métaux très divisés.

Les métallodions de peroxyde de plomb et les métallodiums de plomb réduit ont été proposés comme électrodes positives et négatives dans les accumulateurs électriques.

Electrodes en peroxyde de plomb de M. Tribe (2). — L'inventeur a indiqué l'emploi du peroxyde de plomb, soit en masses comprimées, soit à l'état ordinaire et contenu dans des vases poreux isolants. Il n'a pas décrit son mode d'attache.

Electrodes agglomérées de M. Frankland (3). — La matière active de ces plaques est un mélange durcissant composé d'un oxyde plomb autre que le peroxyde, d'acide sulfurique dilué et d'une solution d'un acide (phosphorique, chlorhy-

(1) Brevet belge, du 30 juin 1882, cité dans l'ouvrage de M. Tamine.

(2) Brevet belge, du 28 février 1883, cité par M. Tamine.

(3) Brevet belge, du 15 mars 1883, cité par M. Tamine.

Digitized by Google

drique, oxalique.....) apte à former des sels de plomb insolubles ou peu solubles. Ces mélanges, appliqués sur des supports conducteurs, font prise et durcissent rapidement.

Accumulateurs à plaques agglomérées de M. René Tamine. — Les plaques Tamine sont obtenues par le procédé suivant : « Une certaine quantité de résine, ou « d'un autre agglomérant, cimente, sous la pression « énorme de 300 atmosphères environ, un mélange de « peroxyde de plomb obtenu par voie électrochimique « et de limaille de plomb, ou de morceaux de plomb « affectant la forme de lames, fils, rubans, etc. Ces « derniers éléments ont surtout pour objet de donner « une bonne répartition du courant dans l'intérieur de « l'électrode. » (1)

Dans la pratique, l'inventeur remplace le peroxyde de plomb, par du minium pour l'électrode positive, et par de la litharge pour la négative. Les proportions respectives sont :

ELECTRODE POSITIVE.

Résine.....	5	parties.
Métal conducteur.....	75	—
Minium	20	—

(1) *Recherches théoriques et pratiques sur les Accumulateurs électriques*, par René Tamine, ingénieur des Ponts-et-Chaussées. Mons, 1885.

Digitized by Google

ELECTRODE NÉGATIVE.

Résine.....	3	parties.
Métal conducteur.....	45	—
Litharge.....	12	—

L'aggloméré positif peut être employé dans des accumulateurs *au cuivre* ou *au zinc* : les électrodes négatives sont alors des lames de cuivre, de zinc ou de charbon.

M. Tamine n'indique pas la capacité voltaïque de ses électrodes agglomérées; elle doit être petite, vu la faible proportion de matières actives indiquée par ses formules.

Lithanode de M. Fitz-Gérald (1). — Le lithanode est un aggloméré cohérent et conducteur, formé par des oxydes de plomb malaxés avec une dissolution de sulfate d'ammoniaque, puis fortement comprimé. Il se produit un dégagement d'ammoniaque, et du sulfate de plomb qui cimente la masse. La compression achève de donner aux plaques une cohésion suffisante pour qu'elles puissent se soutenir sans support métallique. Elles sont pourvues d'un mince appendice conducteur en platine laminé.

La densité du lithanode est de 7,5 à 7,9; sa capacité voltaïque est de 20 à 25 ampères-heure par kilogramme.

Les plaques ont environ 6 millimètres d'épaisseur; elles

(1) Desmond Gérald Fitz-Gérald, patente anglaise A. D., 1885, 15 th. April, n° 4671 : *Improvements in the manufacture of elements for voltaïc batteries.*

Digitized by Google

sont montées avec des supports isolants en celluloïd, dans des récipients de même matière.

Le lithanode constitue de bons positifs; mais il paraît n'avoir donné que des résultats médiocres en électrodes négatives. Les accumulateurs Fitz-Gérald qu'on a pu expérimenter étaient une combinaison de positifs en lithanode avec des négatifs genre Faure-Sellon-Volckmar.

Ces couples sont remarquablement légers : le poids total correspondant au travail électrique de 1 cheval-heure n'est que 31,5 kilogr.

Formation électrochimique. — Les procédés employés pour former les électrodes d'accumulateurs, sont presque tous chimiques et électriques; néanmoins, on réservera la qualification spéciale de *formation électrochimique* au procédé qui consiste à former d'emblée les deux électrodes par un double dépôt électrolytique de peroxyde de plomb et de plomb réduit, empruntés au liquide ou véhiculés par lui.

Dès 1872, M. Gaston Planté a donné le principe de la formation électrochimique, dans un Mémoire *Sur l'emploi des courants secondaires pour* ACCUMULER (1) *ou transformer les*

(1) M. Gaston Planté a, le premier, employé les termes *accumulateur, accumulation, emmagasinement* de l'énergie voltaïque, dont on fait un si fréquent usage depuis quelques années. Il a assimilé ses couples secondaires aux appareils qui servent, en mécanique, à l'accumulation du travail, tels que les accumulateurs hydrauliques, les ressorts, etc.; il a déterminé l'un des facteurs de leur *rendement* et fait remarquer qu' « un couple secondaire à lames de plomb bien *formé* cons- « titue un véritable *accumulateur* du travail de la pile voltaïque » (*Recherches sur l'Electricité*, 1879, paragraphe 89, 91 et 92.)

Digitized by Google

effets de la pile voltaïque. Le célèbre physicien s'exprimait ainsi :

« ....C'est, en somme, un dépôt galvanique de peroxyde de plomb « qu'il s'agit de produire dans ces couples secondaires, dépôt le plus « épais possible pour *accumuler*, sous cette forme, le travail de la pile, « et en même temps, assez adhérent à la surface de la lame *pour « pouvoir subir, sans se détacher, une série indéfinie de réductions et « réoxydations successives.*

« Cette considération m'a conduit à essayer de produire le peroxyde « de plomb sur les lames aux dépens du liquide, afin de pouvoir en « accumuler une plus forte épaisseur, et, pour cela, de former ce « liquide d'un sel de plomb plus ou moins étendu. Mais alors l'eau « acidulée par l'acide sulfurique ne peut plus être employée; car cet « acide précipite les sels de plomb; et, si l'on emploie d'autres solu- « tions acides contenant ce métal, le plomb se dépose sur la lame « négative sous forme d'aiguilles cristallines qui établissent rapidement « des contacts avec la lame positive, et arrêtent ainsi toute décomposi- « tion ultérieure.

« Si l'on a recours à des solutions alcalines, le plomb se dépose sous « une forme spongieuse qui augmente rapidement de volume (1) et « présente un inconvénient analogue au précédent; de plus, le peroxyde « de plomb, une fois déposé, ne tend point à s'attaquer au sein de la « solution alcaline, comme dans l'eau acidulée par l'acide sulfurique, « de sorte qu'on n'obtient plus, dans ces conditions, qu'un très faible « courant secondaire. Je me suis donc arrêté, jusqu'ici, à l'emploi de « l'eau acidulée au 1/10e par l'acide sulfurique qui a toujours fourni, par « son action sur le peroxyde de plomb, un courant secondaire d'une « intensité supérieure à celle de toutes les autres combinaisons acides « ou alcalines. » *(Les Mondes des 14 et 21 mars 1872, t. XXVIII, pages 425 à 431 et 469 à 477).*

(1) « Le dépôt galvanique du plomb sous cette forme, qu'on pourrait appeler « *l'éponge de Saturne*, présente un curieux effet de combinaison en quelque sorte « mécanique de plomb et d'hydrogène. Ce gaz n'est ni combiné ni allié chimique- « ment au métal, car il disparaît par la simple pression; mais il contribue à « augmenter le volume du métal d'une manière remarquable, à l'instar du gaz « ammoniac dans l'amalgame d'ammonium. »

Digitized by Google

Les électrodes *formées* par l'électrolyse d'un plombite alcalin doivent être transportées dans un bain d'eau acidulée sulfurique. C'est ce qui a été fait par M. de Montaud.

Accumulateurs de Montaud. — Les électrodes des accumulateurs de Montaud sont des lames de plomb laminé qu'on *forme* d'emblée, par dépôts électrochimiques, dans un bain de plombite de potasse chauffé à 100° environ. Le courant électrique dépose du peroxyde de plomb compact et adhérent sur les lames positives, du plomb spongieux diffus sur les négatives.

Au sortir du bain, les positives sont prêtes à employer, après un lavage à grande eau. Les négatives doivent être soumises à une pression énergique, qui agglomère la mousse de plomb et la fixe à son support. Le plomb ainsi aggloméré présente à peu près l'aspect du plomb métallique ordinaire, mais il est perméable.

La formation au bain de plombite est très rapide : elle ne dure que 15 à 30 minutes. Le courant doit avoir une intensité d'environ 600 ampères par mètre carré d'électrodes à former.

Les plaques sont de forme rectangulaire (fig. 44), échancrées à l'un de leurs angles supérieurs et doublées sur l'autre. Elles sont découpées deux par deux, l'échancrure de chaque plaque fournissant la matière nécessaire pour doubler un angle de la plaque jumelle. Un trou carré

Digitized by Google

est percé dans l'oreille renforcée. Les plaques négatives alternent avec les positives, les échancrures des unes

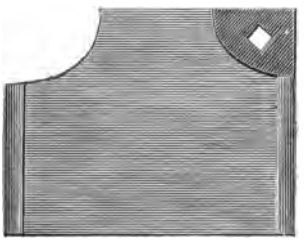


Figure 44.

correspondant aux oreilles des autres. Deux collecteurs de section carrée (fig. 45), faits en alliage rigide de plomb et

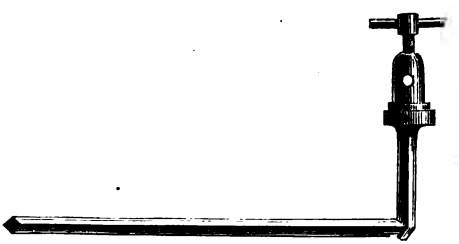


Figure 45.

d'antimoine, traversent respectivement les oreilles positives et négatives, auxquelles ils sont fixés à la soudure autogène.

Des peignes de bois verticaux (fig. 46) servent à maintenir l'écartement des plaques; des peignes horizontaux plus petits achèvent de solidariser les électrodes en un tout compact (fig. 47).

Digitized by Google

Le dessin montre que toutes les oreilles sont rabattues les unes sur les autres par dessus les collecteurs, puis recouvertes d'une lame conductrice, le tout fixé à la soudure autogène.

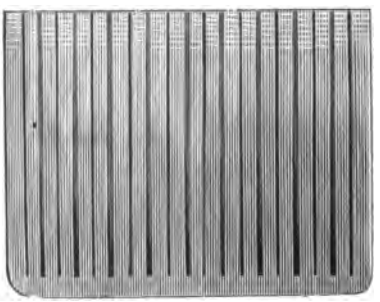


Figure 46.

L'ensemble des peignes forme autour du paquet de plaques des ceintures de bois qui l'isolent des parois des récipients. Ceux-ci sont en grès verni, en verre, en ébonite ou en bois doublé de plomb.

Les lames négatives ont 1 millimètre d'épaisseur ; les positives 2 millim. au moins et 5 millim. au plus, selon la durée qu'on veut leur garantir.

D'après M. de Montaud, on a, par mètre carré d'électrodes :

Régime de charge.....	10 ampères.
— de décharge.....	20 ampères.
Capacité voltaïque utilisable.....	34 ampères-heure.

Digitized by Google

Avec les épaisseurs de 1 millim. pour les lames négatives et de 2 millim. pour les positives, le mètre carré d'élec-

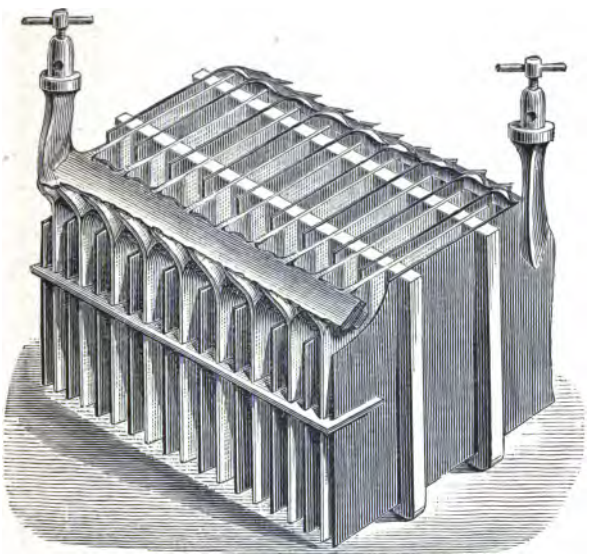


Figure 47.

trodes pèse environ 9 kilogrammes. Par suite les chiffres précédents, ramenés *au kilogramme d'électrodes*, deviennent :

Régime de charge.....	1,11 ampère.
— de décharge.....	2,22 ampères.
Capacité voltaïque utilisable.....	3,77 ampères-heure.

Les régimes de charge et de décharge sont bons ; mais la capacité voltaïque est faible.

Digitized by Google

Digitized by Google

CHAPITRE VI

ACCUMULATEURS DIVERS

ACCUMULATEURS PLOMB — CUIVRE. — ACCUMULATEURS PLOMB — ZINC : *Accumulateurs d'Arsonval et Carpentier ; Accumulateurs Reynier ; Accumulateurs Bailly ; liquide de M. Tamine.* — ACCUMULATEURS AUX ZINCATES ALCALINS : *Piles régénérables de MM. de Lalande et Chaperon ; Accumulateurs Commelin-Desmazures-Bailhache.*

On a exposé au chapitre II (page 41) que les systèmes voltamétriques exploitables sont actuellement au nombre de quatre, donnant naissance à autant de *genres* d'accumulateurs, savoir :

1° Le genre *plomb—acide sulfurique*, ou *genre Planté ;*

2° Le genre *plomb—sulfate de cuivre ;*

3° Le genre *plomb—sulfate de zinc :* ces deux genres comportent la combinaison de positifs Planté avec des négatifs solubles ;

4° Le genre *cuivre—zincate alcalin*, qui n'emprunte rien au genre Planté.

Les nombreuses *espèces* du premier genre ont été décrites dans les chapitres III, IV et V.

Digitized by Google

Les trois derniers genres, moins importants, seront traités dans le présent chapitre.

Accumulateurs plomb—cuivre. — Les propriétés essentielles de ce genre d'accumulateurs ont été exposées dans la description du voltamètre *plomb—sulfate de cuivre*. On a vu que la force électromotrice utilisable de ce couple secondaire est 1,26 volt environ.

Pour faire des accumulateurs plomb—cuivre, il suffit de mettre des positifs genre Planté dans une dissolution de sulfate de cuivre, en présence de lames conductrices inattaquables par ce liquide.

Les réactions chimiques de la charge sont :

$$SO^4Pb + SO^4Cu,Aq + \quad = PbO^2 + 2SO^3,Aq + Cu$$

Electrode positive.	Liquide.	Electrode négative.	Electrode positive.	Liquide.	Electrode négative.

A la décharge, les réactions inverses s'accomplissent, avec redissolution du sulfate de cuivre produit à l'électrode négative.

Le premier accumulateur plomb—cuivre paraît avoir été proposé par M. Sutton, en 1881 (1). Il se composait d'un vase de cuivre, contenant une dissolution de sulfate de cuivre, et au milieu duquel était suspendue une électrode en plomb.

Le vase de cuivre, qui constituait l'électrode négative,

(1) *Scientific Notes.*

Digitized by Google

devait infailliblement s'attaquer et se percer. Il faut que le support du dépôt électrolytique soit insoluble dans le liquide, surtout quand ce support fait office de récipient.

Un accumulateur ordinaire de Planté, modèle en spirale ou à lames parallèles, devient un accumulateur au cuivre si l'on introduit du sulfate de cuivre dans son liquide. Cette transformation serait d'ailleurs loin d'être avantageuse, car elle ferait perdre plus d'un demi-volt à la force électromotrice du couple. En outre, l'appareil serait promptement mis hors de service par des débris de cuivre qui, tombant au fond du récipient et sur les bandes d'isolement, formeraient contact entre les électrodes.

On a cherché à éviter ce dernier inconvénient par l'emploi du dispositif à électrodes suspendues de Reynier (fig. 48). L'accumulateur se composait d'un positif plissé, semblable à celui qui a été décrit et représenté page 69, figure 20, suspendu entre deux lames lisses de plomb laminé, dans une dissolution de sulfate de cuivre. Ici, les parcelles de cuivre détachées de la cathode tombent au fond du récipient. Elles ne produisent pas de contacts ; mais elles sont soustraites à la liqueur et n'y sont plus redissoutes par les décharges ultérieures, d'où un appauvrissement de la dissolution et une diminution de la capacité voltaïque.

Il faut donc préférer des dispositifs à électrodes négatives horizontales, pour retenir le cuivre sur la cathode, laquelle,

Digitized by Google

devenant anode pendant la décharge, remet le cuivre perdu dans la circulation voltaïque.

C'est ce qui a été fait par l'auteur de ce livre, en Mars 1883, lors des expériences de Nantua. Une partie des accu-

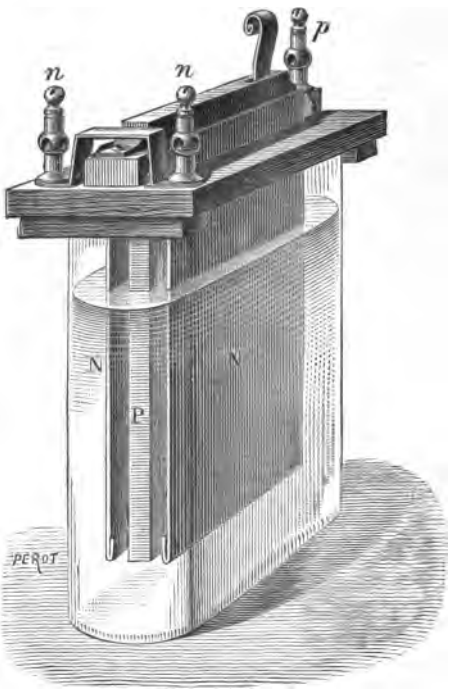


Figure 48.

mulateurs employés étaient *au sulfate de cuivre*, et construits dans le dispositif horizontal déjà décrit page 108, figures 40, 41, 42 et 43. Pour transformer ce modèle mixte en accumulateurs au cuivre, on avait supprimé le minium et

Digitized by Google

remplacé l'eau acidulée sulfurique par une dissolution de sulfate de cuivre. Le fond des cuves de plomb recevait le cuivre électrolysé.

Ces accumulateurs plomb—cuivre sont d'une construction facile et économique ; ils gardent assez bien la charge. Mais leur force électromotrice est peu élevée, et leur capacité voltaïque, rapportée au poids et au volume des appareils, est petite à cause de la faible solubilité du sulfate de cuivre dans l'eau acidulée. Ils sont, en somme, moins avantageux que les accumulateurs du genre Planté, hormis dans les cas peu nombreux où l'on n'utilise qu'une chute de potentiel inférieure à 1,25 volt.

Accumulateurs plomb—zinc. — Le système *plomb—zinc* a été étudié dans ses propriétés essentielles au chapitre *Voltamètres* (page 34). On a vu que les réactions de la charge sont exprimées par l'équation :

$$\underset{\text{Electrode positive.}}{SO^4Pb} + \underset{\text{Liquide.}}{SO^4Zn,Aq} + \underset{\text{Electrode négative.}}{\quad} = \underset{\text{Electrode positive.}}{PbO^2} + \underset{\text{Liquide.}}{2SO^3,Aq} + \underset{\text{Electrode négative.}}{Zn}$$

la décharge *utilisable* produisant les réactions inverses.

Le système plomb—zinc a une force électromotrice de 2,36 volts, soit un demi-volt de plus que le système Planté ; la force électromotrice nécessaire pour le charger est peu supérieure à la chûte de potentiel utilisable : fait dont l'importance sera expliquée au chapitre suivant. Théoriquement, le système plomb—zinc est le moins lourd des couples secondaires connus. Sa construction est économique.

Digitized by Google

Les accumulateurs plomb — zinc primeraient donc tous les autres dans la pratique industrielle, s'ils n'avaient le défaut grave de perdre leur charge par la dissolution spontanée du zinc à circuit ouvert. Peut-être parviendra-t-on à éviter ou à atténuer suffisamment cette attaque locale du métal soluble.

On possède déjà plusieurs espèces d'accumulateurs plomb — zinc.

Accumulateurs d'Arsonval et Carpentier (1). — L'un des modèles réalisés par MM. d'Arsonval et Carpentier est représenté figure 49.

Ce couple affecte la forme d'une pile ordinaire à vase poreux. Le zinc est à l'extérieur. L'électrode positive, placée au centre, est une lame de charbon ou de plomb entourée de grenaille de plomb très fine.

Le morcellement du positif et l'introduction d'un vase poreux devaient donner à l'appareil une résistance trop grande; en outre, l'électrode zinc, n'étant pas pourvue d'un support insoluble, ne pouvait avoir une longue durée.

(1) Brevet français, n° 133884, du 28 novembre 1879, pris par MM. d'Arsonval et Carpentier, pour *Couple secondaire à électrodes de métaux différents.*

Les auteurs présentent, entre autres variantes, le bioxyde de manganèse comme succédané du peroxyde de plomb.

Une Addition du 15 mars 1881 propose d'électrolyser le chlorure de zinc avec deux électrodes de charbon : le chlore se liquéfierait par sa propre pression; le zinc serait recueilli dans un bain de mercure.

Une seconde Addition du 17 août 1881 signale l'emploi des bromure et iodure de zinc, fournissant des dissolutions d'iode et de brôme qui agiraient comme le chlore.

Digitized by Google

Dans un autre dispositif, que les inventeurs n'ont pas représenté, le zinc électrolysé était reçu sur du mercure.

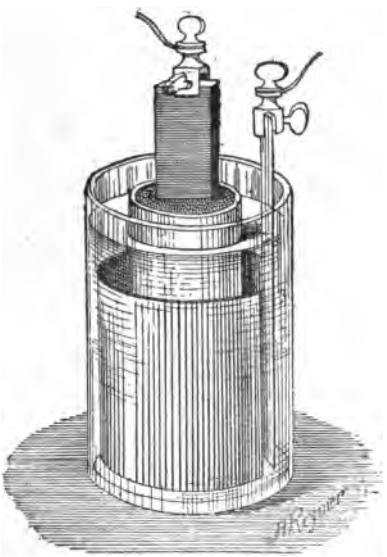


Figure 49.

Accumulateurs Reynier. — Le défaut capital des accumulateurs plomb — zinc c'est, comme on l'a dit déjà, l'attaque spontanée du zinc électrolysé.

Toutes choses étant égales d'ailleurs, cette attaque est proportionnelle à la surface des négatifs.

On atténuera donc la dissipation d'énergie dans les accumulateurs plomb — zinc, en donnant leurs négatifs une surface relativement petite. C'est ce qui a été fait dans les accumulateurs Reynier, par la combinaison des positifs plissés avec des négatifs lisses.

Digitized by Google

Les premiers accumulateurs de ce système ont été improvisés à Nantua, en février 1883. Leur aspect était des plus rustiques (fig. 50).

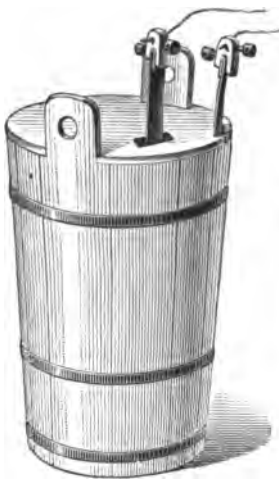


Figure 50

Figure 51.

Figure 52.

Une longue feuille de plomb mince, renforcée sur ses bords, plissée et ajourée, puis roulée sur une carcasse centrale en bois (fig. 52), fonctionnait comme électrode positive; la négative était un cylindre lisse en plomb, tapissant le récipient. Une cage d'osier (fig. 51) séparait les deux électrodes, qui posaient sur un croisillon de bois. Le récipient était une benne de sapin, goudronnée à l'intérieur, et solidement assemblée par des cercles de cuivre.

Les surfaces actives étaient 105 décimètres carrés pour l'électrode positive et 18 pour la négative.

Digitized by Google

L'accumulateur complet pesait 22 kilogr.; sa capacité voltaïque était 300 000 coulombs, sa résistance 0,06 ohm environ, son débit normal 15 ampères.

Ces appareils grossiers ont suffi aux expériences qui motivèrent leur fabrication. Le modèle a été promptement abandonné; mais on a cru devoir le citer, comme étant le premier spécimen d'accumulateur au zinc expérimenté industriellement.

Un peu plus tard, l'inventeur a fait ses électrodes plissées suspendues (fig. 53), déjà décrites au chapitre des

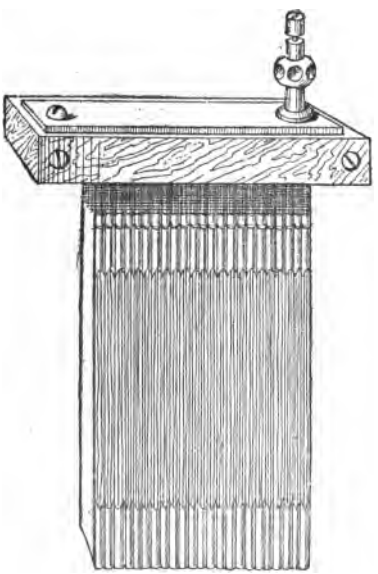


Figure 53.

accumulateurs genre Planté à formation autogène (page 69); il a employé ces plaques comme positifs dans les accumulateurs au zinc.

Digitized by Google

Les électrodes négatives ont été protégées contre l'attaque locale par une amalgamation bien entretenue. A cet effet, la feuille de plomb qui supporte le dépôt de zinc était repliée de manière à former une sorte de poche (fig. 54), contenant

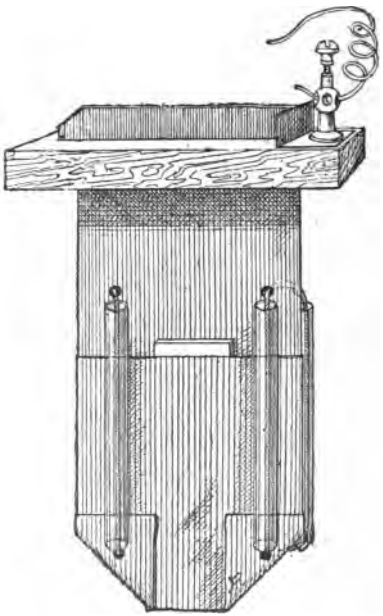


Figure 54.

un morceau d'amalgame solide de zinc et de mercure, aussi riche que possible en ce dernier métal.

Les accumulateurs étaient composés d'électrodes positives plissées, plus ou moins nombreuses, alternées avec des négatives à poche, dont elles étaient isolées par des tubes de verre verticaux (fig. 55).

Digitized by Google

Ces couples étaient garnis d'eau acidulée sulfurique. La première charge dégageait de l'hydrogène sur les surfaces négatives et les décapait parfaitement ; la décharge faisait dissoudre du zinc et libérait du mercure, qui bientôt amal-

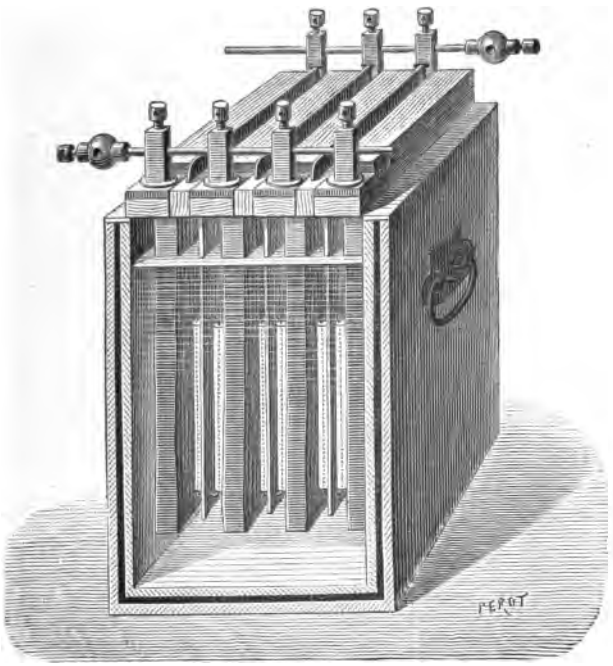


Figure 55.

gamait la surface entière des supports en plomb. Les charges suivantes déposaient sur ces supports le zinc dissous, et le mercure en excès entretenait l'amalgamation — les choses se passant à peu près comme dans le support à amalgamer

Digitized by Google

combiné plus récemment par M. Radiguet, pour ses piles primaires à mélanges chromiques.

Les accumulateurs au zinc ont maintenant comme positifs des plaques Reynier nouveau modèle (fig. 56).

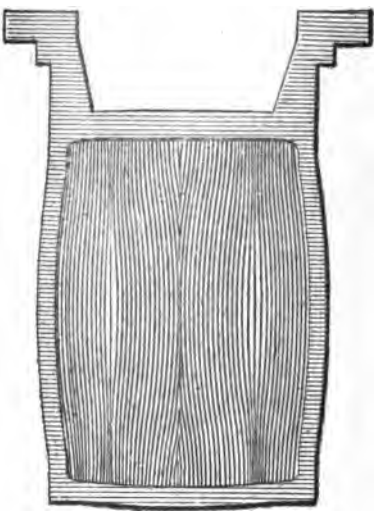


Figure 56.

Les couples montés avec ces plaques, relativement minces, sont beaucoup plus compacts que les anciens. Un récipient de mêmes dimensions contient un nombre double d'électrodes.

Toutes les lames négatives sont constituées par une seule bande de plomb repliée en grecque. Les anciennes poches à amalgame de zinc ont disparu. Les actions locales sont

Digitized by Google

atténuées : 1° par l'emploi de l'eau distillée et du sulfate de zinc pur; 2° par un sel de mercure en dissolution ; 3° par une addition de sulfate d'ammoniaque pur, sel dont l'auteur avait autrefois signalé l'action protectrice (1).

Voici quelques chiffres relatifs à l'accumulateur à 8 positifs :

Longueur extérieure	$0^m,23$	
Largeur	$0^m,23$	
Hauteur	$0^m,32$	
Poids total	20	kilogr.
Poids des 8 électrodes positives	9,600	—
— des 9 — négatives	2,400	—
— du liquide	4,300	—
Force électromotrice	2,37	volts.
Résistance intérieure moyenne, *environ*.	0,005	ohm.
Régime de charge	16	ampères.
— de décharge	40	—
Capacité voltaïque	80	ampères-heure.

Cet accumulateur est remarquable par sa puissance ; mais son travail est médiocre et la conservation de sa charge est encore imparfaite.

Son emploi est indiqué dans certains cas particuliers ; notamment quand il s'agit de *régulariser* un courant, et de prolonger au besoin le service pendant un certain temps après l'arrêt des machines. Il coûte moitié moins cher que les accumulateurs genre Planté de même puissance, et produit une régulation bien plus parfaite.

(1) PILES ÉLECTRIQUES ET ACCUMULATEURS : *Expériences sur l'attaque locale des zincs en circuit ouvert.*

Digitized by Google

Accumulateurs Bailly. — On a peu de renseignements sur ce système. Le seul spécimen aperçu par l'auteur (1) se composait d'un vase rectangulaire contenant un vase poreux méplat dans lequel était plongée une lame épaisse de zinc amalgamé. Des râclures ou copeaux de plomb tassés entre les deux vases constituaient l'électrode positive. Une certaine quantité de mercure était jetée au fond du vase poreux, pour entretenir l'amalgamation du zinc. Cet artifice améliore la conservation de la charge ; mais l'emploi des vases poreux empêche de multiplier les électrodes, alourdit l'appareil et accroît beaucoup sa résistance intérieure.

Le zinc n'ayant pas de support insoluble, menace de rompre après quelques décharges. On est obligé de le retourner de temps en temps.

En somme, ce modèle ressemble beaucoup au type primitif de MM. d'Arsonval et Carpentier, et doit ne lui être guère supérieur.

Liquide de M. Tamine. — M. Tamine a récemment indiqué (2) la composition suivante pour le liquide à employer dans les accumulateurs plomb — zinc :

Solution saturée de sulfate de zinc.....	1 000 parties.
Acide sulfurique au 1/10.....	500 —
Sulfate d'ammoniaque.....	50 —
Sulfate de mercure.....	50 —

(1) Au laboratoire de l'*Ecole de Chimie et de Physique industrielles* de la Ville de Paris.

(2) L'ANNÉE ÉLECTRIQUE, par Ph. Delahaye, janvier 1888.

Digitized by Google

On fait d'abord dissoudre le sulfate d'ammoniaque et le sulfate de mercure; on verse cette dissolution dans l'eau acidulée, puis l'on ajoute le sulfate de zinc.

Ce liquide diffère peu de celui employé dans les accumulateurs Reynier.

Accumulateurs aux Zincates alcalins. — *Piles régénérables de MM. de Lalande et Chaperon.* — Le couple *Zinc — solution de potasse — oxyde de cuivre* est énergique et constant. MM. de Lalande et Chaperon, qui ont les premiers pratiqué cette combinaison voltaïque, en ont fait une bonne pile primaire, dont ils ont signalé la réversibilité (1).

L'un des modèles de leur pile est représenté figure 57.

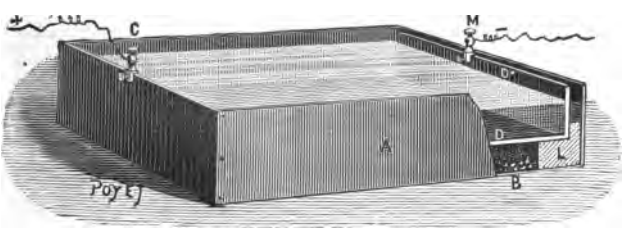


Figure 57.

(1) De Lalande et Chaperon, Brevet français, n° 143 644, du 25 juin 1881, pour *Systèmes de piles électriques*. Les auteurs disent : « Nos piles sont essentiellement réversibles ».

De Lalande, brevet français, n° 150 454, du 3 août 1882, pour *Perfectionnements aux piles électriques*. L'auteur signale des piles secondaires à liqueurs alcalines et à dépolarisants solides, tels que oxydes d'argent, de mercure, de manganèse, de plomb, de nickel, de cobalt, etc.

De Lalande, brevet français, n° 158 945, du 3 décembre 1883, *même objet*. Le mémoire revendique le support du zinc en laiton amalgamé ou tout autre métal amalgamé, etc.

Digitized by Google

A est une cuve étanche en cuivre ou en tôle, constituant le récipient et l'électrode positive de la pile. Le fond de cette auge est garni d'oxyde de cuivre. Le zinc horizontal DD pose par ses angles sur les quatre cales isolantes L,L..., posées dans les coins de l'auge; il est replié verticalement à l'un de ses bouts, qui reçoit la borne négative M. La cuve est au trois quarts remplie d'une dissolution de potasse ou de soude caustique. Cette solution doit être protégée contre l'action de l'acide carbonique de l'air, par un couvercle étanche, ou mieux encore par une couche de pétrole lourd.

Dans d'autres dispositifs, les électrodes sont verticales, les positifs étant constitués par des agglomérés d'oxyde de cuivre (fig. 58), ou par des cages de cuivre remplies de cuivre oxydé.

Figure 58.

L'électrode négative est peu attaquée à circuit ouvert.

Digitized by Google

A circuit fermé, il y a dissolution de zinc avec formation de zincate alcalin et réduction de l'oxyde de cuivre.

On a d'abord admis que ces actions chimiques pouvaient être exprimées par l'équation :

$$Zn + KO,HO + CuO = ZnOKO + Cu + HO \text{ (1)}.$$

D'après une théorie nouvelle de M. Finot, l'action réductrice s'exercerait, non sur le bioxyde de cuivre, mais sur le protoxyde ; elle intéresserait deux équivalents de cuivre :

$$Zn + KO,HO + Cu^2O = ZnOKO + 2Cu + HO.$$

Les piles très connues de de Lalande et Chaperon sont constantes, énergiques et perdent peu à circuit ouvert ; leur force électromotrice n'est que 0,8 volt environ, mais leur résistance est très faible. Elles peuvent fournir des courants intenses.

Cependant la description de ces couples ne trouverait pas place ici, n'était leur *réversibilité*, c'est-à-dire la propriété qu'ils ont ou devraient avoir, d'être régénérables par électrolyse.

Il est certain que MM. de Lalande et Chaperon ont aperçu cette réversibilité, qu'ils l'ont signalée et poursuivie ; il est également certain qu'ils n'ont pas réussi à l'atteindre. En tant qu'accumulateurs, les couples de Lalande et Chaperon ont donc un intérêt purement historique.

(1) Voir *L'Electricien* du 1er Août 1883.

Digitized by Google

Des couples réversibles aux zincates alcalins ont été réalisés par MM. Commelin, Desmazures et Bailhache.

Accumulateurs Commelin, Desmazures et Bailhache (1). — Ces couples ont pour électrodes positives des plaques de cuivre poreux, obtenues par l'agglomération de la poudre de cuivre sous une pression de 600 kilogr. par centimètre carré.

La matière première de ces plaques est du métal très divisé, obtenu par la réduction électrolytique des battitures de cuivre dans un bain de soude caustique. L'opération est faite dans des cuves de cuivre larges, à bords peu élevés; les battitures sont jetées au fond de l'auge, qui constitue le pôle négatif de l'appareil; une feuille de cuivre horizontale, suspendue à une petite distance, est le pôle positif. La poudre de cuivre ainsi fabriquée est partiellement débarrassée du liquide qu'elle retient par une faible compression; elle est ensuite étendue, en poids convenable, dans un moule d'acier où la compression l'agglomère d'un seul coup. Une toile métallique, préalablement introduite dans la poudre, lie la masse : elle consolide l'électrode et retient ses morceaux en cas de rupture.

Les flancs comprimés sont sertis dans un cadre en cuivre terminé par une queue étamée.

(1) Brevet français, n° 183 285, du 3 mai 1887, pris par M. Camille Desmazures, pour *Perfectionnements dans les accumulateurs d'électricité* (sic) *et dans toutes les piles électriques en général.*

Digitized by Google

Le cuivre poreux est oxydé ; dans cet état, il ne donnerait pas de bons resultats. Il faut le désoxyder à vif avant de l'introduire dans l'accumulateur. A cet effet, on lui fait subir une réduction électrolytique préalable, dans un bain de soude ou de potasse que contient un vase profond. Les impuretés du liquide et de l'électrode se déposent au fond de la cuve; le liquide, purifié par l'opération, est décanté pour l'usage.

La nécessité de réduire le cuivre sera expliquée plus loin.

Les électrodes négatives sont des toiles de fer étamées et amalgamées ; l'étain retient le mercure, qui ne tiendrait pas sur le fer nu.

Le récipient est en tôle d'acier étamée. Il est assemblé par agrafages et fait étanche avant l'étamage, de sorte que l'attaque de l'étain ne peut occasionner de fuites. Cette boîte est reliée aux électrodes négatives, qui reposent sur le fond. Les parcelles de zinc électrolysé qui pourraient se détacher de leur support tombent dans le bas du récipient; elles rentrent dans le circuit de décharge et sont ainsi reprises par la liqueur.

Le liquide a la composition suivante :

Eau	1000
Zinc	144,67
Potasse combinée	209,82
— libre	313,72

Digitized by Google

Les électrodes positives sont enfermées dans des cloisonnements en papier parcheminé, maintenus par des baguettes de verre verticales qui les isolent des négatives. Les parchemins sont cousus à la machine. Les coutures ne sont pas d'abord étanches, mais elles le deviennent par l'action du liquide, qui fait coller intimement le papier sur lui-même. Le parchemin subit dans l'alcali caustique une modification profonde ; il gonfle et devient cassant. Mais, il peut, paraît-il, rester longtemps dans cet état et fonctionner sans se rompre, si aucune action mécanique ne vient l'offenser.

Les cloisonnements ont une grande importance; on peut même dire qu'ils sont indispensables. Leur rôle trouve son explication dans les théories de M. Finot.

D'après ce chimiste, les réactions correspondantes à la décharge sont exprimées par l'équation :

$$Zn + KO,HO,Aq + Cu^2O = ZnO, KO,Aq + 2Cu + HO$$

Ce n'est pas du bioxyde de cuivre CuO, mais bien du protoxyde Cu^2O qui est réduit. Cette opinion semble confirmée par l'aspect des électrodes, qui sont roses et non pas noires.

La charge, il est vrai, tend à produire du bioxyde de cuivre; mais ce bioxyde, un peu soluble dans les alcalis caustiques, se transforme en protoxyde au contact du cuivre :

$$CuO + Cu = Cu^2O$$

D'ailleurs le protoxyde de cuivre est colloïde; il ne peut

Digitized by Google

traverser la cloison de parchemin. Emprisonné autour du cuivre, il se décompose comme il vient d'être dit, et ne vient pas se mêler au zincate alcalin. Ce dernier sel étant également colloïde, ne peut aller se diffuser vers le cuivre. La séparation franche des deux électrolytes procure un dépôt de zinc pur et une formation nette de protoxyde de cuivre.

Sans le vase de parchemin, l'oxydation du positif s'opère mal, et le dépôt de zinc est souillé de cuivre ; d'où un manque d'adhérence et des actions locales parasites.

Un couple sans cloisonnement qu'on essaye de charger, monte irrégulièrement, jusqu'à 2,8 volts ; dès qu'on interrompt la charge, sa force électromotrice diminue rapidement ; elle passe d'une valeur à une autre avec des soubresauts accusant des actions locales violentes, et tombe vers 0,1 volt.

Le bioxyde de cuivre n'est pas l'agent actif de l'électrode positive ; il ne saurait même exister au contact du cuivre réduit. Sa présence en quantités importantes dans les plaques empêcherait les couples de fonctionner régulièrement ; d'où la nécessité d'une réduction préalable des plaques positives avant le montage.

M. Finot ne paraît pas s'être converti définitivement à sa propre théorie, car il en a récemment hasardé une autre (1) :

(1) *Bulletin de la Société Internationale des Electriciens*, séance du 7 décembre 1887.

Digitized by Google

« Pendant la charge de l'accumulateur au cuivre, on observe, dit-il, « un phénomène curieux qu'il est utile de signaler, car il tendrait à « montrer que, si l'oxygène n'est pas combiné au cuivre, il est très « possible qu'il soit occlus, grâce aux propriétés particulières des « plaques poreuses.

« En effet, quand on charge l'appareil, on remarque que, dès le début « de la charge, le niveau du liquide s'élève et continue son ascension « progressive jusqu'au moment où l'on arrête la charge. Quand, au con- « traire, on fait la décharge, on constate un phénomène inverse. Le « niveau du liquide s'abaisse graduellement et ne revient à son état pri- « mitif que lorsque l'accumulateur est entièrement déchargé. Si l'oxy- « gène se combinait au cuivre, l'élévation du liquide ne se manifesterait « pas au début, et le niveau ne monterait que lorsque tout le cuivre « serait combiné. Alors seulement, l'oxygène remplissant les pores des « plaques augmenterait le volume du liquide en y prenant sa place. « A la décharge, au contraire, l'oxygène devrait disparaître immédiate- « ment et le liquide reprendre son niveau normal quelques minutes « après la fermeture du circuit ; or ce n'est pas ce qui se produit. »

Ces observations paraissent insuffisantes pour démontrer l'occlusion de l'oxygène dans les positifs. L'ascension du liquide pendant la charge ne pourrait-elle pas s'expliquer plus simplement par les changements de volume des deux électrodes, l'une oxydée, l'autre couverte de zinc ? — Dans le modèle d'accumulateur qui va être cité, les positifs ont un volume de 330 centimètres cubes environ ; leur poids augmente, et très probablement leur densité diminue, quand elles passent, par la charge, à l'état oxydé ; l'augmentation de volume qui en résulte, ajoutée au volume du zinc déposé (80 centimètres cubes d'après le calcul) justifierait peut-être une ascension sensible du liquide dans des récipients étroits, dont la section *totale* est de 120 centimètres carrés seule-

Digitized by Google

ment. Pour trancher la question, il faudrait déterminer les densités du liquide et des positifs après la charge; on en déduirait le volume total des électrodes (y compris le zinc libéré) et du liquide. Ces calculs faciles pourraient rendre inutile l'hypothèse d'une occlusion d'oxygène dans les positifs.

Voici des données numériques assez complètes sur un accumulateur Commelin - Desmazures - Bailhache, modèle léger à grand débit, combiné pour servir à la propulsion d'un petit torpilleur de la marine française :

Digitized by Google

Poids total de l'accumulateur.....	10	kilogr.
— des 5 plaques positives, *non chargées*	1.925	—
— des 6 plaques négatives, idem.	1,050	—
Dimensions des plaques positives (densité 6 environ) — hauteur	0,280	mètre.
Dimensions des plaques positives (densité 6 environ) — largeur.	0,125	—
Dimensions des plaques négatives — hauteur	0,300	—
Dimensions des plaques négatives — largeur.	0,125	—
Surface des électrodes positives.....	35	dm².
— négatives.....	37,50	—
Dimensions extérieures du récipient — longueur.....	0,150	mètre.
Dimensions extérieures du récipient — largeur	0,085	—
Dimensions extérieures du récipient — hauteur.....	0,400	—
Poids du récipient.....	1	kilogr.
— du liquide (à la potasse), densité 1,55.	6	—
— des 11 électrodes et du papier.....	3	—
Force électromotrice à circuit ouvert	?	
Chute de potentiel utilisable	0,75	volt.
Régime de charge.....	15	ampères.
— de décharge.....	48	—
Débit par décimètre carré d'électrodes.....	0,67	—
Durée de la charge.....	30	heures.
— décharge.....	9 ½	—
Capacité voltaïque totale.....	450	ampères-heure.
— utilisable	413	—
Puissance électrique à la décharge	3,67	kgm. par seconde.
Travail électrique total à la décharge.....	0,42	chev.-heure.
Poids de plaques correspondant au *travail* de 1 chev.-heure.....	7,083	kilogr.
Poids total correspondant au *travail* de 1 chev.-heure	23,800	—
Poids de plaques correspondant à la *puissance* de 1 cheval électrique	60,700	—
Poids total correspondant à la *puissance* de 1 cheval électrique.....	204	—

Digitized by Google

Ce tableau a été établi d'après des données communiquées par M. Commelin. Le liquide employé dans le couple est à base de zincate de potasse; le zincate de soude paraît devoir être abandonné : il ne procure que des régimes de charge et de décharge peu intenses, et produit des cristaux grimpants.

La *capacité* et la *puissance* rapportées ici, ont été obtenues par les inventeurs dans des expériences de laboratoire.

Les essais pratiques ont donné des résultats un peu différents; ils démontrent qu'on peut, dans ces accumulateurs comme dans d'autres, forcer le débit, mais au prix d'une perte sensible sur le travail total.

Ainsi, des expériences exécutées au Havre en septembre 1887 sur un petit torpilleur (1), on a tiré :

Poids d'accumulateurs correspondant au *travail* de 1 cheval-heure	33 kilogr.
Poids d'accumulateurs correspondant à la *puissance* de 1 cheval-vapeur	166 —

Les essais faits à terre, en mars dernier, sur une batterie de 10 tonnes destinée à la propulsion d'un bateau sous-marin (2) ont donné :

(1) *Le Figaro* du 23 septembre 1887.

(2) *Comptes rendus* de l'Académie des sciences, séance du 26 mars 1888. Note de M. A. Krebs sur l'*essai d'un moteur électrique alimenté par des Accumulateurs destinés à un bateau sous-marin.*

Digitized by Google

Poids d'accumulateurs correspondant au *travail* de 1 cheval-heure ..... 37 kilogr.
Poids d'accumulateurs correspondant à la *puissance* de 1 cheval-vapeur..... 170 —

Le poids de 166 à 170 kilogr. par cheval-vapeur n'est pas extraordinaire ; il avait déjà été obtenu, sur un canot torpilleur, avec des accumulateurs Reynier à plaques allégées, dans des expériences faites au pont de la Concorde en novembre 1886.

Mais pour la légèreté rapportée au cheval-heure, l'accumulateur C. D. B. l'emporte sur la plupart des couples au plomb.

Il ne faudrait pas en conclure que les accumulateurs aux zincates alcalins soient destinés à supplanter ceux du genre Planté. Au point de vue industriel, on doit considérer :

1° *Le poids :* On a vu (pages 101 et 116) que les accumulateurs F. S. V. et ceux de M. Fitz-Gérald pourraient, dans de certaines conditions, supporter la comparaison avec les C. D. B. ;

2° *Le volume :* à poids égal, les accumulateurs au plomb sont les moins encombrants, ayant des électrodes plus denses et contenant moins de liquide ;

3° *Le rendement :* jusqu'à plus ample informé, il paraît être à peu près le même dans les deux genres ;

4° *Le prix :* on ne connaît pas celui des accumulateurs C. D. B, mais on sait que le cuivre et la potasse sont beaucoup plus chers que le plomb et l'acide sulfurique ;

Digitized by Google

5° *La durée* : les accumulateurs genre Planté sont vulnérables par leurs positifs ; mais on les a beaucoup améliorés dans ces derniers temps. Les C. D. B. ont des positifs qui paraissent devoir être plus durables ; mais comment se comportera l'amalgamation nécessaire des négatifs ? Combien de temps dureront les parchemins ? Que deviendra le liquide, incomplètement protégé contre la carbonatation ? Les dires des inventeurs relativement à la longévité d'un système encore si jeune ne réclament-ils pas la confirmation de la pratique ?

En somme, le succès vif et mérité des accumulateurs C. D. B. et leur adoption pour notre petite marine de guerre, ne doivent pas ralentir l'étude technique et industrielle des autres systèmes. Dans le chemin ouvert par MM. de Lalande et Chaperon, MM. Commelin, Desmazures et Bailhache ont atteint d'emblée des résultats qui témoignent d'une grande habileté ; en déployant une habileté égale dans la mise en œuvre des autres genres, on obtiendrait sans doute des accumulateurs plus légers et beaucoup moins chers.

Avant de clore ce chapitre, on doit rappeler que les positifs des accumulateurs aux zincates pourraient être faits avec des métaux autres que le cuivre. Le brevet Desmazures parle d'électrodes en poudres agglomérées de platine, argent, cobalt, nickel, aluminium, manganèse, fer, etc.

L'argent donne une force électromotrice sensiblement plus élevée que le cuivre, mais il est plus lourd et surtout

Digitized by Google

beaucoup plus cher, pour un même nombre d'équivalents chimiques ; néanmoins M. Desmazures en a indiqué l'emploi pour les accumulateurs destinés à éclairer les ouvriers des mines.

Digitized by Google

TROISIÈME PARTIE

TECHNOLOGIE

Digitized by Google

Digitized by Google

CHAPITRE VII

GÉNÉRALITÉS TECHNIQUES

SUR LES ACCUMULATEURS

CONSTANTES : *Forces électromotrices ; résistances.* — PUISSANCE. — CAPACITÉS VOLTAÏQUES. — TRAVAIL. — DIAGRAMMES DE DÉCHARGE. — RÉGIMES DE CHARGE ET DE DÉCHARGE. — CONSERVATION DE LA CHARGE. — RENDEMENTS : *rendement propre maximum ; rendement propre normal ; rendements pratiques.* — POIDS RAPPORTÉS A LA PUISSANCE ET AU TRAVAIL. — DURÉE DES ACCUMULATEURS ; *leur amortissement.* — FORMULE DE MÉRITE D'UN SYSTÈME D'ACCUMULATEUR.

Les chapitres précédents donnent, sur les accumulateurs les mieux connus, des renseignements numériques qui pourraient à la rigueur suffire dans l'application ; mais ces indications ne se présentent pas en des ensembles d'où l'on puisse aisément dégager des aperçus généraux.

Dans cette *Troisième Partie*, les données éparses dans le livre seront rapprochées les unes des autres, complétées et comparées. Les notions concrètes précédemment acquises par le lecteur lui permettront d'accepter ces généralisations avec la forme technique qui leur convient.

Digitized by Google

Constantes. — La *force électromotrice* est à peu près la même pour tous les accumulateurs d'un même *genre* ; la *résistance*, au contraire, dépend de l'agencement des couples, de leurs dimensions et de diverses particularités.

Forces électromotrices. — Il faut distinguer :

1° La force électromotrice proprement dite, qui est celle d'un accumulateur chargé, mesurée à circuit ouvert ou sur un circuit très résistant, quelque temps après la cessation de la charge ;

2° La chute de potentiel utilisable moyenne en décharge normale ;

3° La différence de potentiel minima pendant une charge très lente, faite avec une source de force électromotrice peu supérieure à celle de l'accumulateur (1) ;

4° La différence de potentiel moyenne pendant une charge normale.

Ces différentes valeurs sont connues pour les 3 premiers genres ; sur le quatrième, on n'a que des indications incomplètes et peu précises :

(1) Voir la note *sur les variations de la force électromotrice dans les Accumulateurs*, dans l'ouvrage PILES ÉLECTRIQUES ET ACCUMULATEURS.

Digitized by Google

	Force électromotrice	Chute de potentiel utilisable moyenne	Différence de potentiel minima pendant une charge très lente	Différence de potentiel moyenne pendant une charge normale
	Volts.	Volts.	Volts.	Volts.
Genre Planté *plomb—plomb* ..	1,86	1,8	1,95	2,2
— *plomb—cuivre*	1,26	1,2	1,42	1,6
— *plomb—zinc*.....	2,37	2,3	2,4	2,6
— *zincates alcalins*.....	0,8 (?)	0,75 (?)	»	1 (?)

Dans les accumulateurs du genre Planté, il faudrait tenir compte du degré de formation. Les valeurs données ici ont été prises sur des couples médiocrement formés, dont les liquides n'étaient additionnés d'aucun adjuvant : une formation poussée loin élève un peu ces chiffres; la composition des liquides influe aussi sur les valeurs de la force électromotrice (voir page 105).

Résistance. — La résistance des accumulateurs dépend de la composition du liquide, de la surface et de l'écartement des plaques, de la température, et, pour les couples du genre Planté, de leur degré de formation.

Dans un même accumulateur, la résistance est très variable. Elle est plus petite pendant la décharge que pendant la charge; parfois elle présente une phase de diminution dans les commencements de la décharge, mais elle est toujours plus grande à la fin de la décharge qu'au commencement.

Digitized by Google

Un repos prolongé augmente beaucoup la résistance des accumulateurs du genre Planté. Ce phénomène est dû à la sulfatation spontanée des matières actives. Après une ou deux charges nouvelles, la résistance revient à ses valeurs ordinaires.

La résistance d'un accumulateur ne peut donc être précisée. Aussi la plupart des constructeurs s'abstiennent-ils de toute indication à cet égard ; ils devraient cependant donner, à titre de renseignement, un chiffre moyen qui pourrait guider les intéressés dans certaines évaluations.

Dans les accumulateurs des quatre genres étudiés, la résistance est généralement très petite : 0,05 ohm à 0,001 ohm, selon les modèles et dimensions.

Puissance. — La *puissance* ne doit pas être confondue avec le *travail*. La puissance est homogène à une force ; c'est le quotient d'un travail par un temps.

La puissance d'un accumulateur, exprimée en *watts* ou *volts-ampères*, est donnée par la formule :

$$P = e\,I,$$

dans laquelle e est la chute de potentiel en *volts* dans le circuit exploité, et I l'intensité du courant en *ampères*.

Les puissances de *1 kilogrammètre par seconde*, de *1 cheval-vapeur* et de *1 kilowatt* valent respectivement 9,81 watts, 736 watts et 1 000 watts ; d'où :

$$P = e\,I \text{ watts};$$

$$= \frac{e\,I}{9{,}81} \text{ kilogrammètres par seconde};$$

Digitized by Google

$$P = \frac{e\,I}{736} \text{ cheval-vapeur;}$$

$$= \frac{e\,I}{1\,000} \text{ kilowatt.}$$

e et I peuvent varier beaucoup, dans les décharges d'un même accumulateur. On reviendra sur ce point en parlant des *régimes*.

La valeur de e I serait *maxima*, pour un accumulateur donné, dans le cas où l'on aurait :

$$e = \frac{E}{2},$$

E étant la force électromotrice du couple considéré.

La puissance extérieure en watts serait alors :

$$P = e\,I = \frac{E^2}{4\,r},$$

r étant la résistance de l'accumulateur supposée connue.

Mais cette condition de décharge est impossible à réaliser, même pendant peu de minutes.

Avec les accumulateurs connus, la puissance qu'on ne peut pratiquement dépasser est celle qui correspond à $e = E \times 0{,}9$. Les *puissances normales* correspondent généralement à des valeurs de e voisines de $E \times 0{,}96$. (Voir le tableau de la page 155.)

Capacités voltaïques. — Il faut distinguer :

1° La *capacité totale*, c'est-à-dire celle obtenue avec une décharge de l'accumulateur poussée aussi loin que possible;

2° La *capacité utile* ou *capacité normale*, ou quantité

Digitized by Google

fournie par la décharge d'un accumulateur bien chargé, travaillant au régime normal; décharge arrêtée avant que la chute de potentiel ait baissé de plus de 5 à 6 pour 100 au-dessous de sa valeur moyenne.

La capacité utile ou normale est la capacité vraie de l'accumulateur, celle qu'il faut comprendre quand il est parlé de capacité voltaïque sans autre épithète;

3° La capacité de charge, ou quantité qu'on peut faire passer dans un couple normalement déchargé, avant qu'il *refuse* la charge. (Le refus est marqué par un dégagement de gaz abondant, indiquant que les matières actives sont complètement chargées et ne peuvent plus fixer les produits de l'électrolyse.)

Capacité voltaïque UTILE *ou* NORMALE. — La capacité voltaïque varie, dans des accumulateurs d'un même genre et d'un même poids, selon la structure et la formation des appareils.

Pour les espèces appartenant au genre Planté, il est d'usage de rapporter la capacité au poids des électrodes. Mais si l'on veut comparer les capacités des accumulateurs de genres différents, il faut les rapporter aux poids des accumulateurs complets — car dans les trois genres qui comportent une électrode soluble, les poids relatifs du liquide et du récipient sont plus grands que dans le genre Planté.

Les capacités de divers accumulateurs ont été indiquées au cours des descriptions qu'on en a faites. Comme indica-

Digitized by Google

tions plus générales, on donne ci-dessous les capacités rapportées au kilogramme d'accumulateur :

Genre Planté	de 2 à 17	ampères-heure.
— *plomb — cuivre*....	de 3 à 8	—
— *plomb — zinc*	de 3 à 8	—
— *Zincates alcalins*..	à 41	—

On verra plus loin que les régimes de décharge influent sur la capacité voltaïque utilisable.

Travail. — Le travail électrique utilisable d'un accumulateur est exprimé en *volts-coulombs* ou *joules*, par la formule

$$W = Q\,e$$

dans laquelle Q est la capacité voltaïque en coulombs et e la chute moyenne de potentiel dans le circuit extérieur.

La quantité Q est égale au produit de l'intensité moyenne du courant I exprimée en ampères, par le temps t donné en secondes : $Q\,e = I\,te$.

1 kilogrammètre vaut 9,81 joules ; 1 cheval-heure vaut 270 000 kilogrammètres ; 1 tonne-mètre vaut 9 810 joules. Le travail électrique extérieur d'un accumulateur peut donc être calculé en joules, en kilogrammètres, en chevaux-heure et en tonnes-mètre par les formules :

$$\begin{aligned} W &= Qe = Ite \text{ joules,} \\ &= \frac{Qe}{9{,}81} = \frac{Ite}{9{,}81} \text{ kilogrammètres,} \\ &= \frac{Qe}{2\,647\,700} = \frac{Ite}{2\,647\,700} \text{ chevaux-heure,} \\ &= \frac{Qe}{9\,810} = \frac{Ite}{9\,810} \text{ tonnes-mètre.} \end{aligned}$$

Digitized by Google

Diagrammes de décharge. — Pour tracer les diagrammes de la décharge d'un accumulateur ou d'une batterie, on porte en abscisses les temps, et en ordonnées la chute de potentiel utile et l'intensité du courant. Entre les mêmes coordonnées on peut inscrire d'autres valeurs calculées, par exemple la *puissance* exprimée en wats ou en kilogrammètres par seconde.

La figure 59 est le diagramme d'une décharge fournie par deux anciens accumulateurs Faure-Volckmar déchargés en tension (1). La décharge a été faite tout de suite après la

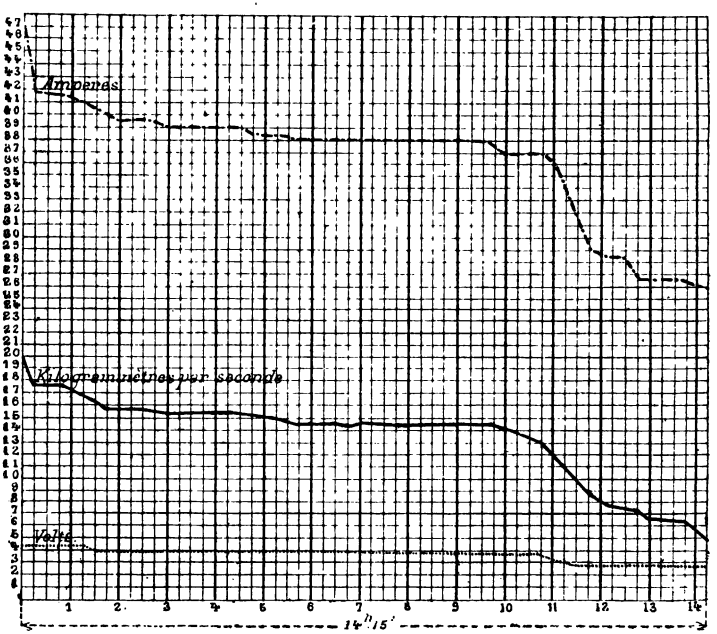


Figure 59.

(1) D'après des expériences faites en octobre 1883 par MM. Fichet, Hospitalier et Jousselin.

Digitized by Google

charge : aussi les courbes accusent-elles, à leur départ, les effets de la surélévation fugitive de la force électromotrice produite par le passage du courant primaire ; elles se soutiennent, assez tendues, sur une certaine longueur, puis elles baissent rapidement à partir d'un certain temps ; c'est à ce point critique qu'on doit, dans la pratique, arrêter le travail des couples.

La capacité voltaïque est proportionnelle à l'aire de la courbe des intensités ; le travail électrique extérieur est proportionnel à l'aire de la courbe des puissances.

Régimes de charge et de décharge. — Pour un même accumulateur, l'intensité normale du courant de charge est toujours moindre que celle du courant de décharge.

Les régimes praticables sont d'autant plus élevés que les surfaces d'électrodes sont plus développées. A poids égal, les accumulateurs à lames minces admettent et émettent des courants plus intenses que ceux à lames épaisses.

La composition des liquides influe sur les régimes plus encore que sur la force électromotrice des accumulateurs.

Dans les couples des 3 premiers genres, le régime normal de charge peut varier entre 0,2 et 1,5 ampère, et le régime de décharge entre 0,4 et 3 ampères par kilogramme d'accumulateur.

Dans les accumulateurs du dernier genre, les régimes paraissent être :

Digitized by Google

	Charge. amp.	Décharge. amp.
Avec le zincate de soude.....	0, 5 à 1	2 à 3.
— — de potasse....	1 à 2	4 à 6.

Les régimes modérés donnent seuls de bons résultats quant à la régularité du courant, au travail et au rendement des batteries.

Les diagrames fig. 60 et 61 mettent en évidence l'influence du régime. Ils expriment la décharge d'un accumulateur Fitz-Gérald pesant 10 kg. 285 et contenant 6,725 kilogr. de plaques (1).

Les décharges à régime forcé (fig. 61) fournissent un moindre travail utile, et par suite un rendement médiocre; elles ont en outre pour fâcheux effet d'abréger la durée des électrodes.

Conservation de la charge. — Au point de vue de la conservation de la charge, le genre Planté est le meilleur, le genre plomb — zinc le moins bon.

La conservation de la charge dépend principalement du degré de formation des couples et de leur isolement interne et externe.

Dans un accumulateur incomplètement formé, l'hétérogénéité des lames détermine des actions locales parasites qui épuisent la charge plus ou moins vite.

La nature des isolants et du récipient a une grande influence sur la conservation de la charge : le verre, la

(1) D'après des expériences faites par M. Gustave Philippart.

Digitized by Google

porcelaine, le grès compact, l'ébonite, le caoutchouc et la gutta sont bons; le bois est médiocre; les étoffes et les feutres sont mauvais.

Pour éviter ou modérer les pertes par dérivations externes, il est utile de poser les accumulateurs sur des cales isolantes imperméables. Cette précaution est indispensable quand les récipients sont métalliques.

Des accumulateurs genre Planté bien formés et bien isolés ne perdent guère plus de 2 pour 100 de leur charge en 24 heures, en circuit ouvert.

Il semble qu'en opposant, à une batterie d'accumulateurs au repos, une pile primaire résistante mais de force électromotrice supérieure, on doive atténuer la décharge spontanée (1); mais cette présomption n'a pas été soumise à l'expérience.

Rendements. — Il faut distinguer :

1° Le *rendement propre* MAXIMUM des accumulateurs;

2° Leur *rendement* NORMAL;

3° Leur *rendement* PRATIQUE.

Rendement propre maximum. — Dans tous les accumulateurs, la force électromotrice secondaire est plus grande pendant la charge que pendant la décharge : d'où la nécessité de donner à la *source* une force électromotrice

(1) Prospectus de la Société *La Force et La Lumière* à l'Exposition d'Electricité, Paris, 1881.

Digitized by Google

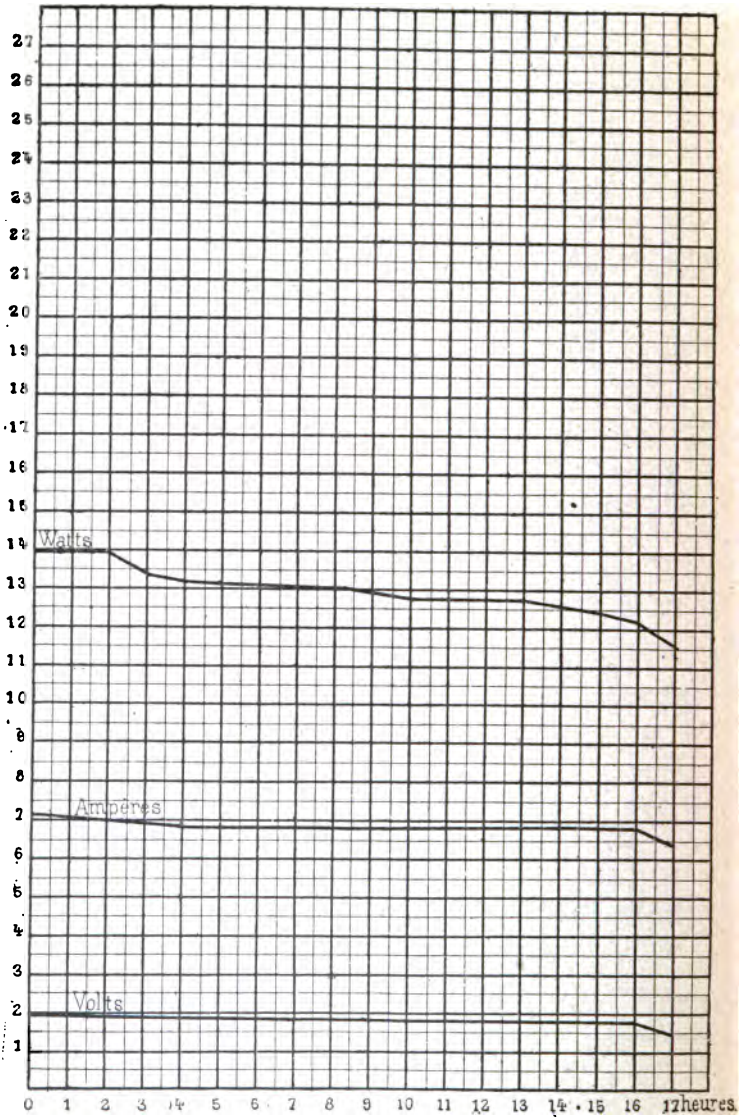


Figure 60.

Digitized by Google

supérieure à celle qui sera ultérieurement utilisée pendant

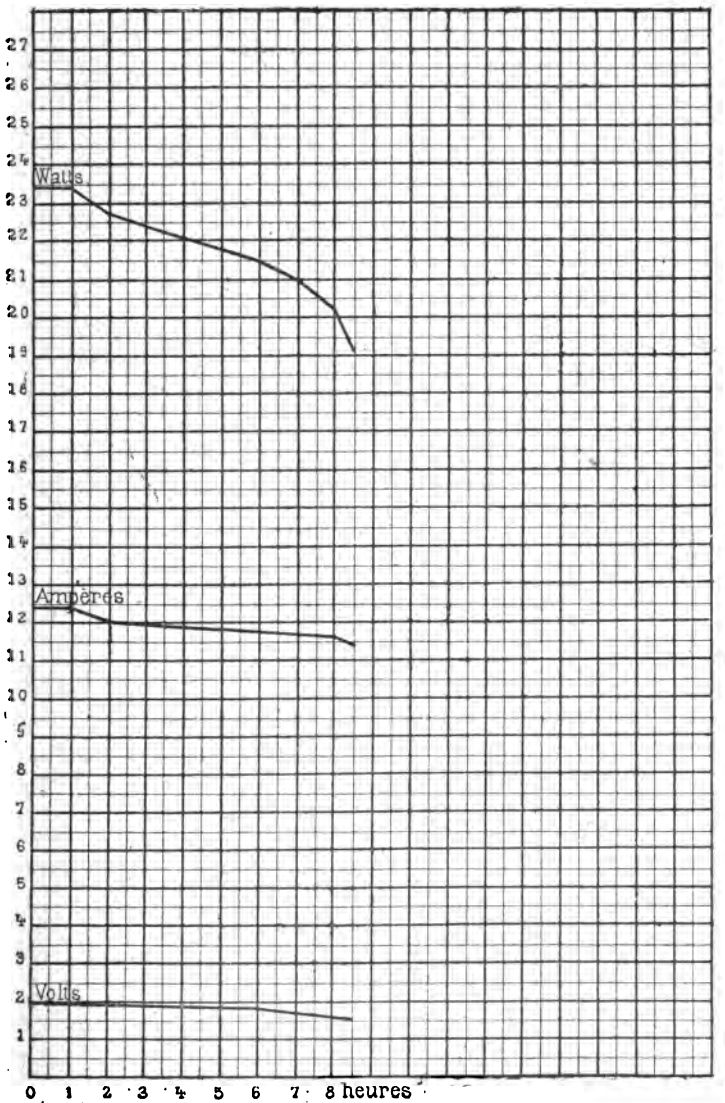


Figure 61.

Digitized by Google

la décharge. Le rapport de la seconde force à la première est le *coefficient de baisse.*

Les accumulateurs ne prennent pas toute la charge qu'on leur donne; ils ne conservent pas toute la charge qu'ils ont prise : des décharges parasites se produisent sans cesse, pendant le repos, pendant la décharge et même pendant la charge. Ces pertes tiennent à plusieurs causes : actions locales entre le liquide et les électrodes, dérivations dans l'accumulateur ou autour de lui, etc. Il en résulte que la *quantité* d'électricité (coulombs) restituée est moindre que celle fournie. Le rapport de la première *quantité* à la seconde est le *coefficient de restitution.*

En mesurant séparément le coefficient de baisse et le coefficient de restitution *dans les conditions les plus favorables* et en faisant le produit de ces deux facteurs, on obtient une fraction qui est le *rendement propre maximum* de l'accumulateur étudié.

L'auteur de ce livre a mesuré les coefficients de baisse dans les 3 premiers genres (1). Il a trouvé :

Pour le genre Planté.....	0,95
— *plomb — cuivre*.....	0,87
— *plomb — zinc*.....	0,98

Le coefficient de restitution n'a été mesuré que pour les accumulateurs du premier genre. M. Gaston Planté l'a trouvé égal à 0,885 pour une décharge normale. En décharge lente,

(1) Voir dans l'ouvrage « Piles Electriques et Accumulateurs » la note *Sur les variations de la force électromotrice dans les Accumulateurs.*

Digitized by Google

il peut atteindre 0,92. Le rendement propre maximum des accumulateurs du genre Planté serait donc

$$0{,}92 \times 0{,}95 = 0{,}87.$$

Il ne faut pas oublier que le rendement propre maximum est une *limite* qu'on ne saurait atteindre pratiquement.

Sa valeur ne peut pas être déterminée pour les 3 derniers genres, car il manque un de ses facteurs : le coefficient de restitution des 2e et 3e genres, le coefficient de baisse du 4e.

Rendement propre normal. — Si l'on mesure la *baisse* et la *restitution* dans les conditions de la charge et de la décharge *normales,* on obtient les *coefficients normaux de baisse et de restitution.*

Les coefficients de baisse normaux peuvent être tirés des chiffres donnés page 155.

Coeff[t] de baisse normal pour le genre Planté	= 1,8 : 2,2	= 0,818
— — *plomb — cuivre*	= 1,6 : 1,2	= 0,750
— — *plomb — zinc*	= 2,6 : 2,3	= 0,885
— — *zincates alcal*	= 1 : 0,76	= 0,760

Les coefficients de restitution normaux, connus seulement pour le 1er et le 4e genres, sont respectivement 0,88 et 0,92. D'où :

Rendem[t] propre normal du genre Planté	= 0,818 × 0,88 = 0,720
— — aux zincates	= 0,760 × 0,92 = 0,699

Rendements pratiques. — Les rendements pratiques sont

Digitized by Google

inférieurs aux rendements propres normaux, parce qu'ils comportent des coefficients de réduction *indépendants de l'accumulateur.*

Ces coefficients varient, quant à leur nombre et à leur valeur, selon les transformations d'énergie nécessaires à chaque sorte d'applications.

S'il s'agit, par exemple, d'un éclairage, les coefficients de réduction sont moins nombreux et moins petits que dans une application à la traction des véhicules.

Ainsi chaque accumulateur possède un seul rendement propre maximum, un seul rendement propre normal, et plusieurs rendements pratiques, variables comme les applications auxquelles il se prête.

Les rendements pratiques seront indiqués, pour un certain nombre de cas particuliers, dans la revue des *Applications*, au chapitre huitième.

Poids rapportés à la Puissance et au Travail. — Il est utile de rapporter les poids des accumulateurs à leur *puissance* et à leur *travail.* Les rapports varient selon les régimes adoptés. En augmentant le débit, on augmente la puissance, mais on diminue le travail, le rendement et la durée des accumulateurs.

Voici les poids correspondant respectivement à la puissance de 1 cheval-vapeur et au travail de 1 cheval-heure, pour quelques espèces connues — valeurs établies pour des régimes acceptables.

Digitized by Google

DÉSIGNATION DE L'ACCUMULATEUR	POIDS d'accumulateur correspondant à la puissance de 1 cheval-vapeur	POIDS d'accumulateur correspondant au travail de 1 cheval-heure
	Kilogr.	Kilogr.
Accumulateur Planté, modèle en spirale, très bien formé.....	200	180
Voltamètre-régulateur (1) genre Planté, modèle de la Ville de Paris.....	110	»
Accum. Reynier, modèle à plaques allégées.	208	63
— Denis Monnier, modèle d'éclairage..	525	85
— Faure, modèle 1881	540	108
— Faure-Sellon-Volckmar, modèle d'éclairage	408	62
— Faure-Sellon-Volckmar, modèle tramcar.....	260	43
— Faure-Sellon-Volckmar, modèle d'expérience.....	200	25,500
— Fitz-Gérald.....	»	31,500
— Plomb—zinc, système Reynier.....	163	80
— au zincate de potasse C. D. B. (expérience de laboratoire).....	204	23,800
— au zincate de potasse C. D. B. (expérience industrielle).....	170	37

Durée. — On ne peut fournir des indications de durée que sur les accumulateurs des 3 premiers genres, ceux

(1) Voir page 187

Digitized by Google

du 4e étant d'application récente, et, jusqu'à présent, soustraits aux épreuves qu'il faudrait leur faire subir pour apprécier leur solidité.

Dans les accumulateurs des 1er, 2e et 3e genres, les négatifs ont une durée fort grande; les positifs, au contraire, périssent au bout d'un certain temps.

Le remplacement des positifs augmente beaucoup le prix des services rendus par les accumulateurs. Pour atténuer les frais d'entretien, les constructeurs doivent fabriquer économiquement ces électrodes et les faire *amovibles*, de telle manière que leur remplacement n'entraîne pas un travail de réfection sur la batterie.

Pour un accumulateur donné, la durée des positifs dépend des régimes de travail et des conditions d'emploi. On ne peut donc donner à cet égard que des indications peu précises.

Quelques constructeurs garantissent, pour les positifs, un millier d'heures de décharge dans les batteries soumises à des transports ou à des chocs (locomotives électriques, etc.) et deux mille heures dans celles qui travaillent à poste fixe ; mais des garanties, en pareille matière, ne peuvent être consenties par le vendeur que sous certaines conditions d'emploi.

Amortissement. — D'après ces vagues renseignements, l'*amortissement* d'une batterie d'accumulateurs, (dont les positifs seuls subissent des renouvellements fréquents), varierait de 20 à 100 pour 100 par année.

Digitized by Google

Formule de mérite d'un système d'accumulateur. — Pour comparer divers systèmes d'accumulateurs, l'ingénieur doit, sur chacun d'eux, réunir les renseignements suivants :

E, force électromotrice,
e, chûte de potentiel utilisable,
Q, capacité voltaïque,
I, intensité normale du courant de décharge,
i, intensité normale du courant de charge,
P, puissance,
W, travail,
coefficient normal de baisse,
coefficient normal de restitution,
prix des accumulateurs,
coût de renouvellement des positifs,
durée probable des positifs et de l'ensemble.

De ces données il tirera :

Rendement propre normal,
Poids rapporté à la puissance,
— — au travail,
Prix rapporté à la puissance,
— — au travail,
Taux d'amortissement.

Avec ces dernières valeurs, on dressera les formules de mérite de tous les systèmes proposés, en attribuant à chaque terme l'importance qui lui convient, relativement à l'application qu'on a en vue.

A l'aide de ces formules de mérite, on fera aisément un choix judicieux parmi les systèmes concurrents.

Digitized by Google

Digitized by Google

QUATRIÈME PARTIE

APPLICATIONS

Digitized by Google

Digitized by Google

CHAPITRE VIII

APPLICATIONS DES ACCUMULATEURS

OBSERVATIONS GÉNÉRALES SUR LA CHARGE DES ACCUMULATEURS. — PREMIÈRES APPLICATIONS DES COUPLES SECONDAIRES, PAR M. GASTON PLANTÉ ; *Applications aux recherches scientifiques*. — APPLICATIONS A LA TÉLÉGRAPHIE, A LA TÉLÉPHONIE, A L'HORLOGERIE, ETC. — APPLICATION A L'ÉCLAIRAGE. — APPLICATION A LA RÉGULARISATION DU COURANT DES MACHINES ; *Voltamètres-Régulateurs*. — SOUDURE DES MÉTAUX. — PRODUCTION DE LA FORCE. — LOCOMOTION ÉLECTRIQUE SUR TRAMWAYS ; LOCOMOTION SUR ROUTES. — NAVIGATION ÉLECTRIQUE. — APPLICATION FUTURE DES ACCUMULATEURS A LA NAVIGATION AÉRIENNE. — TRANSMISSION ET DISTRIBUTION DE L'ÉNERGIE PAR LES COURANTS SECONDAIRES. — TRANSLATION DE L'ÉNERGIE PAR LES ACCUMULATEURS : *Roulage de l'Énergie ; Flottage de l'Énergie*. — CAPTAGE DES FORCES NATURELLES PAR LES ACCUMULATEURS.

Observations générales sur la charge des Accumulateurs. — Avant de commencer la revue des principales *Applications* de l'Accumulateur voltaïque, il n'est peut-être pas inutile de rappeler quelques notions relatives à la *charge* des couples.

Les accumulateurs peuvent être chargés par des piles primaires, ou par des machines dynamo-électriques, ou par des *Transformateurs* à courant continu (1).

(1) Il n'est pas impossible de charger des accumulateurs avec des courants alternatifs.

Digitized by Google

La source de charge est opposée, pôle à pôle, à la batterie d'accumulateurs; c'est-à-dire que le pôle positif de la première est mis en communication avec le pôle positif de la seconde, les pôles négatifs étant de même réunis entre eux.

La force électromotrice de la source de charge doit être supérieure, de 10 à 25 pour 100, à celle de la batterie secondaire.

Les piles primaires sont des sources électriques coûteuses et incommodes, réservées aux recherches scientifiques et aux petites installations d'amateurs.

Les machines dynamo-électriques sont seules en usage dans les installations de moyenne et de grande importance. Elles peuvent être à aimants permanents, ou à électros dérivés (shunt-dynamos), ou à double enroulement (compound), ou à excitation séparée.

Les shunt-dynamos sont les plus commodes et les plus employées.

Quand on sera obligé d'utiliser des dynamos-compound, on prendra le courant de charge *aux balais*, et non aux bornes de la machine, qui fonctionnera ainsi comme une shunt-dynamo.

Dans tous les cas, on prendra les précautions nécessaires pour empêcher le retour du courant de la batterie dans la dynamo-chargeuse, par suite d'une diminution de vitesse ou de toute autre cause. Si l'on n'a pas à sa disposition un bon *disjoncteur automatique*, on intercalera dans le circuit de charge un ou plusieurs fils fusibles, pour éviter qu'un cou-

Digitized by Google

rant secondaire beaucoup plus intense que le courant primaire ne vienne détériorer la dynamo.

Pour charger des accumulateurs avec une *série-dynamo*, il faut employer certains artifices, praticables seulement pour des électriciens exercés.

Tous les moteurs, même les plus irréguliers, peuvent commander des dynamos-chargeuses. Les forces naturelles, (eau, vent...) sont économiques. Les moteurs les plus employés jusqu'à présent sont les machines à vapeur.

L'usage des moteurs à gaz, à pétrole, à air chaud, commence à se propager. La marche saccadée des moteurs à gaz est sans inconvénient pour la charge des accumulateurs.

Premières applications des couples secondaires, par M. Gaston Planté. — En faisant connaître les premiers accumulateurs, M. Gaston Planté n'a pas manqué de signaler l'utilité de ces précieux magasins d'énergie électrochimique.

Le célèbre physicien a d'abord proposé ses couples secondaires pour remplacer avantageusement les piles primaires, dans ceux de leurs emplois qui réclament un courant intense pendant un temps assez court. Dans les Recherches sur l'Electricité, on trouvera l'exposé de ces Applications, dont les principales sont : l'*incandescence des fils métalliques* et leur emploi pour la *galvanocaustique*; la *chirurgie dentaire*; l'*éclairage des cavités obscures* du corps humain; l'*inflammation des mines*; l'*allumage des bougies*, etc.

Digitized by Google

(briquet de Saturne); l'*analyse eudiométrique de l'air*, etc.; les *usages médicaux;* la production de la *lumière électrique* dans certains cas particuliers; la *distribution de l'heure;* l'application aux *freins de chemins de fer* (réalisée par M. Achard); les *opérations galvanoplastiques;* le *sondage et le forage des roches;* la *gravure sur verre,* etc., etc.

Pour la plupart de ces applications, M. Planté a indiqué les dispositifs à employer.

Application aux Recherches scientifiques. — Mais c'est surtout comme moyen de recherches scientifiques que M. Planté a pratiqué l'emploi de ses accumulateurs.

Avec une pile primaire de 2 couples à acide nitrique, il *charge, en quantité,* un grand nombre de couples secondaires, qui sont *réunis en tension pour la décharge.* Les couplages sont effectués commodément à l'aide d'un commutateur ingénieux, bien connu des physiciens. On donne un quart de tour à l'instrument pour faire passer les accumulateurs du couplage *en quantité* au couplage *en tension*, ou *vice versa.*

Muni de ses couples secondaires de faible résistance et de son commutateur, M. Gaston Planté obtient, dans son laboratoire, des tensions de 100, 1 000, 2 000, 4 000 volts — avec une source primaire dont la force électromotrice est inférieure à 4 volts.

Les accumulateurs, devenus un moyen d'investigation aussi puissant que commode, ont permis à leur inventeur de réaliser nombre de belles expériences, dont il faut lire le récit dans ses magistrales Recherches. On y trouvera,

Digitized by Google

décrits et expliqués : la *gaîne lumineuse* obtenue autour de l'un des fils d'un voltamètre (40 couples) ; les *globules lumineux* au sein des liquides (200 à 800 couples) ; les *flammes globulaires*, *aigrettes voltaïques* et *figures lumineuses* (800 couples) ; *l'étincelle voltaïque ambulante* (800 couples) ; les *gerbes de globules aqueux* et les *jets de vapeur* (400 couples) ; les *mouvements giratoires* d'une veine liquide électrisée (400 couples) ; le *mascaret électrique* (400 couples) ; la *pompe voltaïque* ; la *lumière électro-silicique* (60, 80, 350 couples, selon le liquide employé) ; les *spirales électrodynamiques* (10 à 20 couples) ; l'*illumination d'un tube de Geissler par un courant continu* (800 couples) ; les perforations cratériformes (400 couples) ; etc., etc.

Poussant plus loin la recherche des hautes tensions, M. Gaston Planté a inventé la *Machine Rhéostatique*, qui est un des plus beaux instruments de la Physique. Cet appareil transforme l'électricité d'une pile secondaire de 600 à 800 couples, et l'amène aux potentiels des machines dites *d'électricité statique*, de sorte qu'on atteint les plus hautes tensions à l'aide d'une double transformation, en partant d'une pile primaire de 4 volts.

La *Machine Rhéostatique* se compose, en principe, d'un certain nombre de *condensateurs* constitués par des lames de mica recouvertes de feuilles d'étain, et disposés de manière à pouvoir être *chargés en quantité* et *déchargés en* tension. Cet appareil donne des étincelles de 1 à 5 centimètres de longueur.

Digitized by Google

M. Gaston Planté a tiré de ses belles expériences l'explication de quelques grands phénomènes naturels : la foudre globulaire, les éclairs en chapelet, la grêle, les trombes et les cyclones, les aurores polaires, etc. Ces vastes aperçus sur la Météorologie ont été développés dans un ouvrage spécial, récemment paru (1).

Par suite de l'importance industrielle considérable qu'ils ont subitement prise dans ces dernières années, les Accumulateurs ont absorbé, à leur profit, une part de l'attention due aux recherches purement scientifiques de M. Planté. Cette partie de son œuvre, d'une utilité moins apparente aux yeux de la foule, est pour le physicien une source de révélations importantes sur les questions les plus hautes de la philosophie naturelle.

Application à la Télégraphie, à la Téléphonie, à l'Horlogerie, etc. — Dans les exploitations télégraphiques, téléphoniques, etc., les piles primaires, d'un emploi coûteux, seraient avantageusement remplacées par des accumulateurs périodiquement rechargés. Cette substitution a déjà été faite, avec succès, dans quelques postes importants.

La qualité première des accumulateurs destinés à ce genre de services, est la bonne conservation de la charge.

La force motrice à dépenser, pour la charge périodique des batteries télégraphiques et téléphoniques, est peu

(1) *Phénomènes électriques de l'Atmosphère.*, par Gaston Planté. Paris, 1888.

Digitized by Google

importante. On a calculé (1) qu'avec une force motrice de 1 cheval-vapeur travaillant 12 heures par jour, on desservirait les 3 000 postes du réseau téléphonique de Paris. Ce réseau emploie environ 30 000 couples primaires, presque tous du système Leclanché.

Dans les applications télégraphiques, le *rendement pratique* des accumulateurs, depuis le moteur jusqu'aux appareils, comporte 3 facteurs :

a, Transformation du travail mécanique en énergie électrique dans la dynamo-chargeuse. $a = 0{,}85$;

b, Rendement propre normal des accumulateurs. $b = 0{,}72$;

c, Coefficient de perte : lente dissipation de la charge dans les accumulateurs, dont la décharge est très lente et longtemps différée. $c = 0{,}7$.

D'où :

Rendement pratique $= a \times b \times c = 0{,}43$.

Ce rendement est fort avantageux, vu le prix du travail des moteurs industriels comparé à celui des piles primaires, qui dépensent au moins 2 francs par cheval-heure, manipulations non comprises.

Application à l'Eclairage. — L'Eclairage électrique est actuellement l'application la plus importante des batteries secondaires.

(1) PILES ÉLECTRIQUES ET ACCUMULATEURS : *Sur le Travail des piles Leclanché en service sur le réseau téléphonique de Paris;* d'après des expériences faites en commun avec M. André Reynier, en 1883.

Digitized by Google

L'emploi des accumulateurs présente comme avantages : 1° la *sécurité de l'éclairage*. 2° sa *régularité*, les accumulateurs n'ayant pas de brusques variations de force électromotrice. 3° l'*indépendance des brûleurs* : quand les accumulateurs ont des surfaces assez développées, leur résistance est pratiquement négligeable; il en résulte que leur débit se règle naturellement d'après le nombre des lampes en fonction. Par suite, l'allumage ou l'extinction d'un certain nombre d'entre elles est sans influence sur les autres. 4° la *plus grande durée des lampes à incandescence*, qui sont mises à l'abri des variations destructives.

On peut dire que, seul, l'éclairage électrique par accumulateurs est de tout repos. Aussi est-il imposé pour le service de secours dans les théâtres.

Le *rendement pratique* des accumulateurs, depuis le moteur jusqu'à la canalisation des lampes, ne comporte que 2 facteurs :

a, Transformation du travail mécanique en énergie électrique dans la dynamo-chargeuse. $a = 0{,}85$;
b, Rendement propre normal des accumulateurs. $b = 0.72$.

D'où :

Rendement pratique $= a \times b = 0{,}576$.

Il faut remarquer que l'éclairage direct par machines comporte déjà le coefficient *a;* de sorte que le rendement du procédé par accumulateurs, *relativement au procédé direct*, est réellement celui des accumulateurs mêmes, soit 0,72.

Digitized by Google

En fait, le rendement relatif est généralement plus élevé. Car, avec les accumulateurs, la dépense d'énergie est proportionnelle à la consommation utile, tandis que, dans le procédé direct, cette dépense devient beaucoup plus grande relativement, aussitôt que le matériel machines cesse de travailler en pleine charge, comme cela arrive souvent.

Quand un éclairage important ne fonctionne qu'un petit nombre d'heures chaque jour, l'emploi des accumulateurs permet de réduire l'importance de l'usine. Ainsi dans un théâtre, dont le service ne dure en moyenne que 32 heures par semaine, le matériel moteur et dynamos pourrait n'être qu'*un tiers* seulement de ce qu'il est avec l'éclairage direct.

Tous comptes faits, l'emploi des accumulateurs dans l'éclairage réduira souvent le coût de première installation et la dépense journalière, en apportant la sécurité et la régularité dans le service.

Il est facile de calculer la batterie à employer pour un éclairage donné. Le nombre d'accumulateurs à réunir *en tension* est le quotient du potentiel nécessaire, par la chute utilisable de chaque couple. Connaissant la durée du service, le nombre de lampes à illuminer et leur consommation en ampères, on détermine aisément la *capacité voltaïque* (ampères-heure) que doivent posséder les couples de la batterie, et le *régime de débit* maximum qui leur est imposé. Le type d'accumulateur choisi devra suffire à la fois à la capacité et au régime exigés. Souvent ces exigences ne

Digitized by Google

concordent pas : s'il faut un grand débit pendant peu de temps, on est obligé de prendre des couples puissants, qui ne seront pas déchargés complètement ; s'il faut au contraire un débit faible longuement prolongé, les accumulateurs devront avoir une grande capacité et ne travailleront pas à pleine puissance.

Ces considérations conduisent à choisir, dans certains cas, un système qu'on repousserait dans certains autres.

Quand la capacité et le régime exigés excéderont ceux des types existants ou maniables, on emploiera plusieurs batteries réunies *en quantité*.

Application à la Régularisation du courant des Machines ; Voltamètres Régulateurs. — La vitesse d'une machine dynamo-électrique est rarement uniforme : les impulsions rythmées du moteur, les défauts de la transmission, les variations du travail résistant, accélèrent et retardent alternativement son allure moyenne. Les variations de la force électromotrice, résultant de ces irrégularités, sont plus ou moins marquées, selon le degré de perfection de l'installation ; plus ou moins supportables, selon la nature des services demandés.

S'il s'agit, par exemple, d'un éclairage par incandescence, de petits changements de vitesse produisent de grandes variations d'éclat dans les lampes, l'intensité lumineuse étant à peu près proportionnelle à la *sixième puissance* de la différence de potentiel aux deux branches de la distribution. Dans les lampes à gros charbon, ces irrégularités

Digitized by Google

sont atténuées, à cause de la masse de l'organe lumineux; mais dans celles à filament fin, dont l'emploi tend à devenir dominant, les variations d'éclat sont très nettes, et d'autant plus fâcheuses qu'elles sont synchroniques dans toutes les lampes.

Les accumulateurs, on le sait, rendent le courant sensiblement régulier, parce que leur force électromotrice a des variations beaucoup moindres que celle de l'électromoteur qui les charge. Dans les accumulateurs du genre Planté, la surélévation de la différence de potentiel n'est que 8 pour 100 de l'excès de force électromotrice de la source. Ceci explique pourquoi les éclairages électriques avec accumulateurs sont généralement d'une grande régularité, même avec des installations mécaniques défectueuses.

On objecte que cette régularité serait payée trop cher, dans les cas où l'on n'aurait à demander aux accumulateurs que ce service de *volant*, sans utiliser leurs propriétés comme *magasin*.

Pour cet emploi restreint, l'auteur de ce livre a proposé l'emploi de couples secondaires économiques, dont les caractères spéciaux sont une grande surface d'électrodes, une résistance intérieure très petite, un régime de décharge intense, une faible capacité voltaïque et un prix peu élevé.

Ces couples qui ne sont pas, à proprement parler, des accumulateurs, ont reçu le nom de *voltamètres-régulateurs*.

La question de *capacité* étant écartée dans la réalisation des couples régulateurs, le choix des combinaisons s'élargit.

Digitized by Google

A côté du genre Planté, qui s'impose presque toujours pour les accumulateurs, d'autres systèmes voltaïques peuvent être employés. Le couple *plomb—sulfate de zinc* paraît être le meilleur de tous, quand une longue conservation de la charge n'est pas exigée. Sa force électromotrice élevée, 2 volts 4, au lieu de 1 volt 9, permet de diminuer le nombre des couples et la résistance de la batterie; ses variations sont moindres encore que celles de la combinaison plomb — plomb; enfin, quand une certaine capacité est nécessaire, pour fonctionner pendant 15 à 30 minutes en cas d'accident, il peut être *formé* d'emblée.

L'accumulateur Reynier à positifs plissés et négatifs lisses, décrit page 134, est un bon voltamètre régulateur. Pour cet emploi spécial, ses positifs sont généralement mis en service sans formation préalable; ils sont ainsi moins coûteux et plus durables.

Pour donner à ces voltamètres une certaine capacité d'accumulation, il suffit de faire subir la préparation nitrique de M. Gaston Planté aux électrodes positives, qui acquièrent ainsi la propriété de fixer une certaine quantité d'oxygène et d'acide sulfurique; quant aux négatifs, ils se *forment* d'emblée par un dépôt de zinc électrolytique. Une batterie de voltamètres dont les positifs ont été convenablement préparés, peut prolonger l'éclairage pendant une demi-heure, délai suffisant dans la plupart des cas pour permettre de réparer l'accident qui a causé l'arrêt, ou tout au moins de prendre les mesures que comporte la situation.

Avec la surface d'électrodes indiquée page 135, le couple

Digitized by Google

zinc—plomb peut régulariser un courant de 50 à 75 ampères. Sa force électromotrice, *sous charge*, étant environ 2 volts 5, il ne faudrait que 42 voltamètres de ce modèle pour régulariser (et prolonger au besoin) la lumière de 100 à 150 lampes à incandescence de 15 à 16 bougies. Pour le même service, des accumulateurs au plomb devraient être construits dans un format double, et employés au nombre de 50. L'économie réalisée par la substitution est de 65 pour 100. Aussi les voltamètres sont-ils destinés à remplacer les accumulateurs, toutes les fois qu'il s'agit seulement de régulariser un éclairage, et de prendre assurance contre des extinctions subites.

Les voltamètres régulateurs ont reçu déjà un certain nombre d'applications.

La plus importante est la grande batterie installée par l'auteur, en mars 1877, à l'Hôtel-de-Ville de Paris. Elle est faite dans le genre *plomb—plomb*, la Direction des Travaux n'ayant pas osé adopter, malgré ses avantages, le système *zinc—plomb*, qui n'avait pas encore fait ses preuves.

La batterie, divisée en trois groupes, comprend 159 couples; elle pèse 11 tonnes et contient 4 500 litres de liquide. Sa puissance est de 100 chevaux.

Les couples sont du genre Planté, modèle classique en spirale; mais les détails de construction ont dû être appropriés aux dimensions des appareils et à leur destination.

Les deux électrodes de chaque couple sont renforcées par des ourlets. Les queues ont été fortement consolidées et

Digitized by Google

protégées contre les causes de destruction électrochimiques et mécaniques. L'isolement est assuré par deux cloisons en bois tranché, séparées par des baguettes de bois verticales presque jointives. Le récipient de verre est protégé contre les chocs internes et externes par des tampons de feutre ; il est surmonté d'un couvercle qui abrite le tout et modère l'évaporation du liquide. De forts boulons en alliage de plomb-antimoine assemblent les éléments en trois séries égales et distinctes.

On a donné aux électrodes une surface considérable : 480 décimètres carrés.

La capacité voltaïque pourrait atteindre un million de coulombs. Le cahier des charges n'a réclamé que 300 000 coulombs, suffisants pour soutenir l'éclairage pendant 20 à 30 minutes, dans le cas d'un arrêt accidentel survenu aux machines; un certain nombre de voltamètres, montés en surcharge, seraient alors intercalés dans les circuits d'éclairage, pour compenser la diminution de force électromotrice produite par la défaillance de l'usine.

La batterie de l'Hôtel-de-Ville de Paris peut être citée comme une application remarquable des couples secondaires à l'éclairage. Dans un avenir prochain, les batteries de cent chevaux et plus deviendront assez communes; mais quant à présent, on n'en connaît pas d'autre de cette force.

La régularisation d'un courant par une batterie de voltamètres coûte une certaine quantité d'énergie, proportionnelle à l'intensité du courant qu'elle dérive. D'autant plus forte est

Digitized by Google

la fraction dérivée, que plus fortes et plus brusques sont les variations primaires, plus parfaite la régulation exigée. Cette fraction peut varier entre 2 et 10 pour 100 avec les couples plomb — plomb, entre 1 et 6 pour 100 avec les couples zinc — plomb. On la règle empiriquement, en diminuant ou augmentant le nombre des voltamètres en série, pour augmenter ou diminuer leur influence régulatrice.

Quand les voltamètres doivent servir à prolonger le service après l'arrêt des machines, il faut compenser, au moment voulu, la perte de potentiel que produit la cessation du courant primaire. L'artifice le plus simple consiste dans l'emploi d'une série de quelques voltamètres supplémentaires : pendant la marche normale, cette série est couplée *en quantité* avec un même nombre de couples pris à une extrémité de la batterie principale ; à l'arrêt des machines, on couple *tout en tension*, pour obtenir la compensation nécessaire. La manœuvre peut être exécutée au moyen d'un commutateur Planté à deux directions, ou de tout autre coupleur approprié.

Soudure des métaux. — Les effets calorifiques des courants sont utilisables pour le travail des métaux, notamment pour la soudure.

La première indication relative à la soudure des métaux a été fournie par M. Gaston Planté, en 1868 :

« Les décharges données par ces batteries secondaires sont, disait-il, d'assez longue durée pour produire les effets calorifiques les plus intenses, tels que la fusion des tiges de platine, de fer, d'acier, etc.

Digitized by Google

« Le platine peut être, par ce moyen, soudé à lui-même, avec une grande facilité. A plus forte raison en est-il de même des autres métaux moins réfractaires que le platine. » (1).

Ce procédé a été transporté dans la pratique industrielle par M. Elihu Thomson (2), qui a réussi à souder le fer, l'acier, le platine, l'or, la fonte, le laiton, le bronze, le maillechort, le zinc, l'étain, le plomb, l'aluminium, le cuivre, etc.

Les barres, tubes ou autres pièces qu'il s'agit d'assembler sont fortement comprimés l'une contre l'autre ; on fait passer, à travers la jonction, un courant électrique intense, qui pénètre par les appendices massifs dont sont munies les pièces de serrage. La chaleur développée par le passage du courant est très grande à la surface de jonction (qui offre une résistance relativement considérable) ; elle élève jusqu'à la fusion la température des bouts affrontés et les unit intimement.

M. Elihu Thomson a soudé ainsi des tringles de cuivre de 11 millimètres de diamètre et des barres d'acier de 22 millimètres. Il estime à 20 000 ampères (3) l'intensité du courant employé, la chute de potentiel utile étant 1/2 volt seulement. Ce courant était obtenu à l'aide d'une dynamo auto-excitatrice à courants alternatifs et d'un *transformateur*.

(1) Addition du 29 février 1868 au brevet français, n° 78 897, du 18 décembre 1867, intitulé : *Disposition des batteries secondaires à lames de plomb et ses applications.*

(2) Travail publié dans *The Electrical World* et traduit dans la *Revue internationale de l'Electricité*, numéro du 20 mai 1887.

(3) Ce chiffre paraît exagéré, relativement à la section des pièces citées.

Digitized by Google

Le courant nécessaire pour souder une barre d'acier de 38 millimètres est estimé à 50 000 ampères et réclamerait une force de 35 chevaux pendant moins d'une minute.

Pour des opérations si brèves, les couples secondaires seraient plus avantageux que les transformateurs. La force motrice pourrait être réduite de 95 pour 100. On prendrait des accumulateurs de petite force électromotrice (tels que ceux du deuxième genre), spécialement construits pour un grand débit et une faible capacité ; on les chargerait *en tension* pour les décharger *en quantité*. Le débit normal des accumulateurs peut être triplé, quand on fait des décharges courtes sans se préoccuper du rendement. On obtiendrait donc des courants très intenses avec une batterie peu coûteuse.

Les soudures électriques peuvent être faites par l'arc voltaïque. Ce procédé comporte des forces électromotrices plus élevées et des intensités beaucoup moindres ; il est d'un maniement plus commode que le précédent et s'applique à des cas plus nombreux.

La chaleur de l'arc voltaïque a été employée par William Siemens, Wallner, Cowles, etc., pour fondre des métaux réfractaires ; mais la première application de l'arc, avec emploi des batteries secondaires, pour la soudure proprement dite, paraît appartenir à M. A. de Méritens (1) qui a pratiqué ce procédé pour la fabrication des accumulateurs

(1) Brevet français, nº 146 010, pris le 24 novembre 1881, pour *Mode de soudure par l'Électricité.*

Digitized by Google

Tommasi. Le même moyen a été employé en 1882, dans les ateliers de M. de Kabath.

Plus récemment, M. Benardos (1) a élaboré un ensemble de dispositifs pour la réalisation industrielle de la soudure par arc voltaïque, appliquée aux opérations les plus variées.

Une batterie d'accumulateurs, qu'on peut coupler de diverses manières, fournit le courant. La pièce métallique à souder est le pôle négatif de l'arc; le pôle positif est un cylindre de charbon monté sur un support approprié. L'arc voltaïque produit entre la pièce et le charbon est promené sur les parties à fondre; il constitue une sorte de chalumeau puissant.

Une dynamo, fonctionnant sans interruption, charge la batterie d'accumulateurs. Celle-ci n'est déchargée que par intermittences; elle fournit un courant secondaire beaucoup plus intense que le courant primaire. La chute de potentiel et l'intensité sont réglées par des couplages et par un rhéostat.

Les accumulateurs sont à faible capacité et à grand débit. M. Benardos les construit, comme M. de Kabath, avec des bandes de plomb alternativement lisses et ondulées; mais il a remplacé les anciennes cages par des montures suspendues imitées des cadres Reynier. Il est évident que

(1) *La Soudure Electrique par le procédé Benardos :* conférence faite à la *Société Electrotechnique de Berlin,* par M. Rühlmann; traduite dans la *Revue Internationale de l'Electricité* du 5 février 1888;

Procédés de soudure par l'électricité, appliqués par Benardos et analysés par Kamenski. Traduction par M. Przewoski, publiée dans les *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils,* février 1888.

Digitized by Google

tous autres accumulateurs à grandes surfaces pourraient être employés.

La chute de potentiel dans l'arc varie de 40 à 175 volts. L'intensité du courant, plus variable encore, n'a pas été indiquée : elle est peut-être de 100 à 1 000 ampères. On modifie ces valeurs selon la masse et la nature des pièces à souder.

Le charbon est plus ou moins gros ; il a parfois 25 millim. de diamètre et 250 millim. de longueur.

La main du soudeur doit être protégée par une garde de carton, et sa vue par un verre de couleur. Pour les opérations d'une certaine durée, il se munit d'un masque en soie enduit de résine, pourvu d'un cadre mobile vitré et percé d'ouvertures pour la respiration. L'absence de ces précautions exposerait l'opérateur à tous les accidents d'un coup de soleil.

On fait avec l'arc voltaïque les soudures les plus variées, sur les métaux réfractaires comme sur les fusibles. Il faut citer spécialement la fonte, qu'on ne peut pas souder par les procédés ordinaires.

Pour le fer, l'acier et la fonte, on emploie comme *fondant* du sable ou du borax, qui facilite la séparation des scories produites par l'oxydation du métal.

Étant connues les constantes de l'arc voltaïque employé, on peut calculer sa *puissance en calories par seconde*.

Si *e* est la chute de potentiel en volts et I l'intensité du

Digitized by Google

courant en ampères, la puissance calorifique, P, de l'arc voltaïque, est :

$$P = 0{,}243\ e\ I \text{ calories gramme-degré par seconde.}$$

Production de la force motrice. — En 1873, MM. Gaston Planté et Alfred Niaudet firent une belle expérience qui démontrait simultanément la réversibilité des couples secondaires et des machines magnéto-électriques à courant continu (1).

Les bornes d'une machine Gramme à aimant étaient réunies à celles d'un accumulateur Planté, *formé* mais non chargé (fig. 62). On chargeait l'accumulateur en faisant tourner la machine pendant un certain temps ; puis on arrêtait le mouvement et l'on quittait la manivelle ; aussitôt on voyait la machine se remettre à tourner, moins vite et dans le même sens que pendant la charge.

Cette importante expérience, qui aujourd'hui n'excite plus d'étonnement, contenait en germe l'exploitation des forces motrices naturelles et industrielles par les accumulateurs. Au point de vue théorique, elle mettait en évidence la lutte des forces électromotrices dans un système composé d'une source voltaïque et d'une machine magnéto-électrique.

La force électromotrice de la source est à peu près fixe ; celle de la machine dépend de son allure. Pour une certaine vitesse de la machine, qu'on peut appeler la *vitesse critique*,

(1) *Sur une expérience d'électro-dynamique*, par G. Planté et A. Niaudet. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, tome LXXVI, page 1259, année 1873.

Digitized by Google

les forces électromotrices sont égales ; aucun courant ne passe dans le circuit. Une vitesse plus grande fait dominer la force électromotrice de l'appareil magnéto-électrique ; celui-ci alors dépense du travail mécanique, le transforme en énergie électrique et charge l'accumulateur.

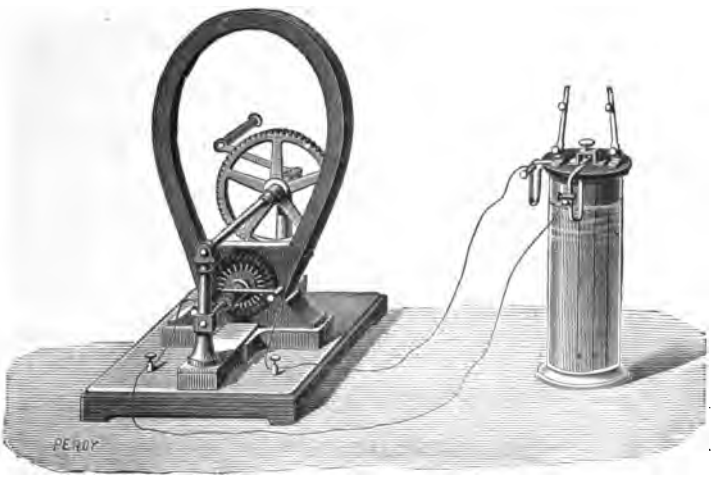


Figure 62.

Quand l'allure est, au contraire, inférieure à la vitesse critique, c'est la force électromotrice voltaïque qui domine : l'accumulateur se décharge et fournit de l'énergie électrique que la machine, devenant *moteur*, transforme en travail mécanique.

La théorie mathématique de ces phénomènes a été fixée par M. Mascart (1).

(1) *Des machines magnéto-électriques et électro-dynamiques,* JOURNAL DE PHYSIQUE, juillet 1877.

Digitized by Google

Si l'on appelle :

E, la force électromotrice de la batterie voltaïque, exprimée en volts;
e, la force électromotrice antagoniste de la machine, en volts;
R, la résistance totale du circuit, en ohms;

la puissance mécanique théorique, P, de la machine, est

$$P = \frac{e\,(E - e)}{g\,R} \text{ kilogrammètres par seconde.}$$

L'allure du moteur dépend du travail résistant.

Quand le moteur tourne *à vide*, sa vitesse devient telle que *e* soit voisin de E. Le faible travail produit est dépensé en frottements; il se résout en chaleur, et le *travail utile* est nul. Si, au contraire, le moteur est *calé* au repos, sa force électromotrice et son travail mécanique sont *zéro*. Par contre, le travail calorifique est le plus grand possible; il est équivalent à

$$\frac{E^2}{g\,R} = \frac{I^2\,R}{g} \text{ kilogrammètres par seconde,}$$

I étant l'intensité du courant en ampères.

Entre ces deux régimes extrêmes, qui donnent des *travaux utiles nuls*, sont les régimes d'utilisation.

Dans tous les cas le *rendement théorique* de la machine, fonctionnant comme *moteur* sous l'action d'une batterie d'accumulateurs, est :

$$\frac{e}{E}$$

Digitized by Google

Son rendement pratique comporte 3 facteurs :

a, rendement propre de la machine qui a chargé les accumulateurs : $a = 0{,}85$;
b, rendement propre des accumulateurs : $b = 0{,}72$;
c, rendement propre du moteur électrique.

Ce rendement *c* comporte lui-même deux facteurs :

c', rendement électrique du moteur, dépendant de sa résistance électrique et surtout de son allure : $c' = \frac{e}{E}$;
c'', rendement mécanique du moteur, ou rapport entre le travail utilisable et le travail total, (la différence entre ces deux travaux étant absorbée par les résistances passives).

Le rendement électrique $\frac{e}{E}$ peut varier entre 0 et 1 ; dans la pratique on peut, en travaillant aux allures favorables, faire en sorte qu'il soit au moins égal à 0,9. Quant au rendement mécanique, il n'est pas inférieur à 0,95 avec les machines bien construites, qui comportent peu de frottements. Donc

$$c = c' \times c'' = 0{,}9 \times 0{,}95 = 0{,}855$$

Par suite, le *rendement pratique* U, d'un moteur électrique fonctionnant par accumulateurs, est, depuis le moteur mécanique actionnant la dynamo-chargeuse jusqu'à la poulie du moteur électrique :

$$U = a \times b \times c = 0{,}85 \times 0{,}72 \times 0{,}85 = 0{,}52$$

Dans certains cas, il y a d'autres coefficients de réduction à subir.

Digitized by Google

Les Applications des accumulateurs à la production de la force motrice, trop peu répandues jusqu'à présent, prendront une importance considérable dans l'industrie. On y reviendra à propos de la Locomotion sur tramways et sur routes, de la Navigation électrique et du Captage des forces naturelles.

Locomotion électrique sur tramways. — L'application des accumulateurs à la locomotion a été proposée par M. Camille Faure, en 1880 (1). Les premières tentatives industrielles remontent à 1883; elles sont dues à M. Simon Philippart père.

L'auteur de ce livre a donné la description et la critique de ces essais dans l'*Électricien* (2). Cette étude, reproduite dans le livre PILES ÉLECTRIQUES ET ACCUMULATEURS, indiquait l'emploi des *couplages variés* propres à fournir les divers *régimes* appropriés aux variations du travail résistant; elle montrait en outre la possibilité de *récupérer*, par la recharge des accumulateurs en route, une partie des travaux négatifs correspondant aux descentes sur pentes rapides. Le mémoire se terminait par une estimation du prix de revient, et concluait à l'économie de la traction par accumulateurs sur la traction animale, dans les pays où les chevaux coûtent cher d'achat et d'entretien.

(1) Brevet français, nº 139 258, du 20 octobre 1880, pour *Perfectionnements aux Batteries galvaniques et applications de ces batteries aux machines locomotives électriques.*

(2) Numéros des 1 et 15 septembre 1883.

Digitized by Google

Ces aperçus techniques ont reçu la sanction de la pratique, hormis la récupération par *recharge sur route*, qui n'a pas encore été réalisée.

Les notions qu'on va rappeler ici, touchant la locomotion par accumulateurs, sont empruntées au mémoire cité.

Pour remorquer un véhicule, aller et retour, sur une voie de chemin de fer ou de tramway accidentée, la somme d'énergie à dépenser comprend :

1° Le *travail de traction* proprement dit, W, proportionnel au poids M du véhicule, à la longeur L de la ligne et au coefficient de traction, k :

$$W = M \text{ (en kilogrammes)} \times L \text{ (en mètres)} \times k \qquad \text{kilogrammètres.}$$

2° La somme W' des *travaux élévateurs*, POSITIFS OU NÉGATIFS, w'_1, w'_2, w'_3...., résultant des changements d'altitude h_1, h_2... du train, dans les trajets hors palier. Le travail élévateur est le produit du poids M du véhicule par la différence de niveau :

$$w'_1 = M \text{ (en kilogr.)} \times h_1 \text{ (en mètres)} \qquad \text{kilogrammètres.}$$

3° La somme W'' des dépenses de *puissance vive* POSITIVES OU NÉGATIVES, w''_1, w''_2..., occasionnées par les départs et les arrêts. La quantité de puissance vive mise en jeu chaque fois est

$$w''_1 = \frac{M \text{ (en kilogr.)}}{2g} \times V^2 \text{ (vitesse en mètres par seconde)} \qquad \text{kilogrammètres}$$

Digitized by Google

Un train qui, parti d'une station, y revient après un parcours plus ou moins accidenté, coupé par des arrêts, n'a point accru ni diminué son énergie de position ; il n'a pas gagné ni perdu de puissance vive. On peut écrire :

$$W' = w'_1 + w'_2 + \ldots = 0$$
$$W'' = w''_1 + w''_2 + \ldots = 0$$

Théoriquement, le travail de traction se réduirait au roulement proprement dit.

Dans la pratique, les travaux d'élévation et de démarrage sont, au contraire, considérables, car les accumulateurs pourvoient à tous les travaux élévateurs *positifs*, à tous les départs ; et les travaux *négatifs* de descente et d'arrêt sont presque entièrement absorbés par les freins. On pourrait cependant récupérer une fraction de ces travaux négatifs.

Ainsi qu'on l'a vu page 196, la puissance mécanique théorique, P, du moteur électrique actionné par les accumulateurs est

$$P = \frac{e\,(E - e)}{g\,R} \text{ kilogrammètres par seconde.}$$

Cette formule montre deux manières de faire varier la puissance motrice et la vitesse du train :

1° L'augmentation ou la diminution de E ;
2° La diminution ou l'augmentation de R.

Quand on fait varier E en ajoutant ou retirant des accu-

Digitized by Google

mulateurs, la *dépense* devient inégale dans les couples; c'est une perte fort grande à la charge et à la décharge. Si l'on introduit des résistances supplémentaires, elles sont le siége d'une émission de chaleur qui, dans certains cas, est une fraction considérable du travail total. Enfin, ni l'un ni l'autre procédés ne permettent de *récupérer* (c'est-à-dire de recharger les accumulateurs aux descentes rapides et aux arrêts brusques), puisqu'avec les dynamos excitées en circuit e est toujours plus petit que E.

Des résultats meilleurs sont obtenus au moyen de *couplages*. On donne au moteur électrique un circuit d'excitation distinct, et l'on utilise concurremment des variations artificielles de E et de R : celles de E sont produites par des groupements d'accumulateurs donnant des *régimes* distincts; celles de R s'effectuent dans des limites restreintes, pour produire des puissances graduées entre les régimes tranchés fournis par les commutations. Les divers groupements de la batterie sont obtenus par un commutateur *ad hoc*, facile à combiner.

Ce procédé a été employé par divers constructeurs, qui le revendiquent sans tenir compte des publications antérieures.

On devrait le compléter par des dispositifs permettant de *récupérer* une partie des travaux négatifs (descentes sur pentes rapides et arrêts brusques), en rechargeant les accumulateurs sur route. La batterie reprendrait une partie de sa charge, en absorbant du travail mécanique transformé, à condition que l'on fît, en temps opportun, $e > E$.

Digitized by Google

La complication des moyens n'est qu'apparente. Il est possible d'agencer des commutateurs opérant successivement les groupements nécessaires dans l'ordre voulu. Par la manœuvre simple d'un instrument compliqué, le pilote irait de la puissance positive la plus élevée à la puissance négative la plus forte, en passant par tous les régimes intermédiaires, sans qu'il lui fût nécessaire de raisonner les diverses combinaisons effectuées.

Quant à l'agencement matériel des locomotives ou des voitures automobiles, c'est une question de mécanique spéciale qui ne peut être traitée ici.

Le prix de revient de la traction par accumulateurs comprend d'abord le coût de la force motrice à l'usine, l'entretien et l'amortissement du matériel moteur; à ces dépenses principales s'ajoutent les frais accessoires de graissage, manutention et loyers.

Etant connue la longueur d'une ligne de tramway et son profil en long, le parcours kilométrique du train et son poids en charge, on peut calculer, avec les formules de la page 199, la quantité de travail fournie quotidiennement par les chevaux. On en tire, par majoration, la somme de travail qu'il faudrait dépenser *indirectement* pour faire le même service par piles secondaires. Le poids d'accumulateurs à employer ressort de ces estimations.

Le travail mécanique à fournir par l'usine qui charge les accumulateurs, est de beaucoup supérieur à celui qu'on demanderait aux chevaux. Car les transformations succes-

Digitized by Google

sives de l'énergie, depuis la poulie de la dynamo chargeuse jusqu'aux roues motrices, introduisent cinq coefficients de réduction, savoir :

Les 3 facteurs déjà connus $a = 0{,}85$; $b = 0{,}72$; $c = 0{,}85$ (voir page 197);

d, transmission mécanique de la force du moteur électrique aux roues motrices. $d = 0{,}9$.

f, rapport entre le poids utile et le poids total remorqué : le poids additionnel du matériel électrique étant près de la moitié de celui du train remorqué, ce rapport est 1 : 1,5 d'où $f = 0{,}66$.

D'où :

Rendement pratique depuis le moteur de l'usine jusqu'aux roues motrices :

$$= a \times b \times c \times d \times f = 0{,}85 \times 0{,}72 \times 0{,}85 \times 0{,}9 \times 0{,}66 = 0{,}31.$$

Le travail mécanique à dépenser à l'usine est donc celui fourni par les chevaux multiplié par

$$\frac{1}{0{,}31}$$

En réalité, la majoration est moins grande, surtout si l'on récupère électriquement une partie des travaux négatifs. La récupération électrique est d'autant plus importante que la voie est plus accidentée. Sans aucun artifice, on récupère toujours un peu, dans les pentes modérées, en utilisant la déclivité de la voie.

On est sans doute assez près de la vérité en disant que le coefficient pratique de majoration serait

$$\frac{1}{0{,}40} \text{ ou } \frac{1}{0{,}34},$$

selon qu'on userait ou non de la récupération électrique.

Digitized by Google

Étant connue la force motrice à dépenser à l'usine, on peut évaluer le coût du travail de traction, les autres éléments de ce prix de revient étant donnés d'autre part.

Pour comparer le prix de la traction animale avec celui de la traction par accumulateurs, il faut dégager, dans l'un et l'autre systèmes, le coût du cheval-heure utile.

Cette estimation comparative a été faite, pour Paris, dans le Mémoire cité. On a trouvé :

Prix du *cheval-heure* utile, dans la traction animale.....	2 fr. »»
— — — par accumulateurs	1 fr. 29

L'économie en faveur de la traction par accumulateurs est de 35 pour cent (1).

Indépendamment de cette économie importante, la traction par accumulateurs offre des avantages spéciaux, qu'on n'a pas à faire ressortir ici.

Locomotion électrique sur routes. — Sur des chemins en bon état, tels que nos routes nationales françaises, le coefficient de traction d'une voiture libre, munie de bonnes roues, n'est pas très élevé ; sur des voies asphaltées ou pavées en bois, l'effort au roulement est petit, plus petit souvent que sur les tramways.

La locomotion électrique des voitures semble donc pouvoir être réalisée ; elle l'a été, en effet, par quelques amateurs.

(1) Quelques chiffres sont à modifier dans l'étude faite en 1883 ; mais les différences en plus et en moins se compensent à peu près.

Digitized by Google

La difficulté spéciale à la locomotion sur routes, c'est la recharge des accumulateurs.

Un tramcar revient à son point de départ cinq à vingt fois par jour ; le renouvellement de sa provision d'énergie est assuré. La voiture, au contraire, court à des destinations quelconques ; il faut bien avouer que les usines chargeuses ne sont pas, quant à présent, d'une rencontre fréquente.

La distribution de l'énergie électrique dans les villes permettrait d'y établir, çà et là, des stations de charge. Encore faudrait-il que les accumulateurs pussent être chargés en peu de temps. Or, ceux que nous connaissons n'admettent que des charges lentes. On devrait donc remplacer, batterie pour batterie, les accumulateurs épuisés par d'autres chargés, la substitution étant faite moyennant un certain prix.

Cette solution serait encore incomplète. Une voiture à accumulateurs ne pourrait se mouvoir qu'en des itinéraires limités ; elle n'aurait pas l'indépendance des véhicules à moteur thermique, qui refont aisément leur provision d'énergie.

Navigation électrique. — Dans cette application, les difficultés mécaniques sont à peu près nulles. La condition importante à réaliser est la légèreté spécifique de la batterie.

Les calculs que comporte la navigation électrique s'appuient sur des formules connues, qu'on rappellera succinctement.

Digitized by Google

L'effort utile, F_u, à exercer sur un bateau, pour le faire avancer dans des eaux larges et tranquilles, est donné par l'expression :

$$F_u = k \frac{AV^2}{2g} \text{ tonnes,}$$

dans laquelle :

A, est le maître-couple (la plus grande section transversale de la partie plongée du bateau), en mètres carrés ;
V, la vitesse en mètres par seconde ;
k, coefficient très variable, dépendant de la forme du bateau.

La plus petite valeur de k qu'on ait obtenue est 0,045. Les bateaux à vapeur bien taillés pour la course en mer ont $k = 0{,}10$ à $0{,}16$.

Les valeurs de k augmentent quand la section de l'eau n'est pas très grande par rapport à A. Pour des bateaux rapides naviguant en canaux étroits, k a pu atteindre 0,20 et même 0,27 (Morin).

La *puissance motrice utile* est proportionnelle à l'effort et à la vitesse ; elle est donc :

$$P_u = F_u V = k \frac{AV^3}{2g} \text{ tonnes-mètre par seconde}$$

$$= k \frac{AV^3}{2g} \times \frac{1000}{75} \text{ chevaux-vapeur.}$$

Le *travail utile* W_u est le produit de l'effort utile par l'espace parcouru L (qu'on exprime en mètres) :

$$W_u = F_u L = k \frac{AV^2}{2g} \times L \text{ tonnes-mètre,}$$

$$= k \frac{AV^2}{2g} L : 270 \text{ chevaux-heure.}$$

Digitized by Google

Ces expressions ont été vérifiées jusqu'aux vitesses de 7 à 8 mètres par seconde, qu'on ne dépasse pas dans la pratique.

En rivières, l'eau a une vitesse propre u. Pour obtenir une vitesse V′ du bateau par rapport à la rive, il faut produire une vitesse $V + u$ ou $V - u$, selon que le bateau monte ou descend, V étant la vitesse du bateau par rapport à l'eau.

Il faut donc, pour la navigation en rivières, remplacer V par

$$V' = V \pm u.$$

Le moteur électrique, actionné par les accumulateurs, se gouverne d'après la formule

$$P = \frac{e\,(E - e)}{g\,R}$$

qu'on a expliquée plus haut (voir page 196).

Les expressions des valeurs de P_u et de W_u montrent que le problème de la navigation diffère beaucoup de celui de la locomotion à terre. Les différences principales sont mises en évidence dans le parallèle suivant.

Digitized by Google

LOCOMOTION ÉLECTRIQUE A TERRE	NAVIGATION ÉLECTRIQUE
L'*effort utile* est indépendant de la vitesse.	L'*effort utile* est proportionnel *au carré de la vitesse.*
La *puissance utile* est proportionnelle à la vitesse.	La *puissance utile* est proportionnelle *au cube de la vitesse.*
Pour un trajet donné, le *travail* à dépenser est théoriquement *indépendant de la vitesse.*	Pour un trajet donné, le *travail* à dépenser est théoriquement proportionnel *au carré de la vitesse.*
Pour aller vite, il faut une batterie puissante.	Pour aller vite, il faut une batterie excessivement puissante.
On peut aller assez loin, *quelle que soit l'allure*, avec les batteries qu'on possède actuellement.	Avec les batteries connues, il est impossible d'aller loin *à grande vitesse. A petite vitesse* on pourrait, au contraire, faire des trajets fort longs.
On peut *récupérer* une partie des travaux élévateurs et des puissances vives, pour la recharge des accumulateurs sur route — la dynamo fonctionnant comme *chargeuse* sous l'impulsion du train, dans les descentes rapides et les arrêts brusques.	Pas de récupération.

Digitized by Google

Ces considérations expliquent pourquoi des essais de navigation *à petite vitesse* ont pu être réussis, avec des piles ou des accumulateurs ordinaires, par des amateurs ou des techniciens médiocres.

La navigation électrique *à grande vitesse* ne serait actuellement réalisable qu'avec les accumulateurs les plus puissants, sur des navires de fort tonnage et de formes allongées.

La marche *à moyenne vitesse* a été obtenue par M. Krebs, sur un canot torpilleur de 8m,80. Il a fait 6,4 nœuds en Seine (vitesse par rapport à l'eau 11 852 mètres à l'heure) avec des accumulateurs Reynier (1), et 6,6 nœuds (12 223 mètres à l'heure) en mer avec des accumulateurs Commelin-Desmazures-Bailhache (2). Ces vitesses sont remarquables, vu le faible tonnage de l'embarcation et sa forme lourde, qui donne au coefficient k une valeur élevée.

On a rapporté les formules au moyen desquelles se calculent les valeurs P_u et W_u de la puissance et du travail utiles. Il faut, pour obtenir la puissance et le travail effectifs, P et W, diviser P_u et V_u par le produit de deux coefficients qui sont :

d, transmission mécanique de la force du moteur électrique à l'organe propulseur ; $d = 0{,}9$.

f, rendement propre de l'organe propulseur. Avec de bonnes hélices d'assez grand diamètre, on peut admettre $f = 0{,}86$.

(1) Expériences faites au Pont de la Concorde, en novembre 1886.

(2) Expériences faites au Hâvre en septembre 1887.

Digitized by Google

De sorte que :

$$P = \frac{P_u}{0{,}774} \quad \text{et} \quad W = \frac{W_u}{0{,}774}.$$

Le *rendement* des accumulateurs, depuis la dynamo-chargeuse jusqu'à son utilisation finale, comporte 5 coefficients, savoir les facteurs d et f dont il vient d'être question, et les 3 coefficients $a = 0{,}85$, $b = 0{,}72$ et $c = 0{,}85$, communs à toutes les applications mécaniques des couples secondaires. (1)

On a donc :

Rendement pratique des accumulateurs, depuis la poulie de la dynamo-chargeuse jusqu'à l'utilisation finale

$$= a \times b \times c \times d \times f = 0{,}40.$$

Il faut remarquer que le coefficient f doit être subi dans tous les cas; de sorte que l'emploi des accumulateurs ne majore le travail à dépenser que dans le rapport

$$\frac{1}{a \times b \times c \times d} = 2{,}14$$

C'est-à-dire qu'il faut produire 2,14 chevaux-heure à l'usine pour obtenir 1 cheval-heure sur l'arbre du propulseur.

(1) Voir page 197.

Digitized by Google

Application future des Accumulateurs à la navigation aérienne. — Les piles primaires ont déjà été employées, avec un certain succès, pour la propulsion des aérostats dirigeables. Les accumulateurs pourront donc, eux aussi, concourir aux voyages aériens, dès que leur légèreté sera devenue comparable à celle des piles les moins lourdes.

Voici les poids des couples voltaïques les plus légers (piles et accumulateurs), rapportés à la puissance de 1 cheval-vapeur et au travail de 1 cheval-heure :

	Cheval-vapeur	Cheval-heure
Pile Gaston Tissandier : *zinc amalgamé — charbon — solution concentrée de bichromate de potasse et d'acide sulfurique*.....	75 k.	30 k.
Pile Ch. Renard : *zinc non amalgamé — argent plaqué de platine — solution d'acides chromique, chlorhydrique et sulfurique*.....	36 k.	18 k.
Accumulateur *plomb — zinc*, système Reynier.	163 k	»
Accumulateur Faure-Sellon-Volckmar, modèle d'expérience.....	200 k.	25,5
Accumulateur Commelin-Desmazures-Bailhache.....	170 k.	37 k.

C'est surtout pour le *poids rapporté à la puissance* que les accumulateurs sont distancés.

Mais on peut espérer que les piles secondaires atteindront,

Digitized by Google

dépasseront même la légèreté des piles primaires. En prévision de cet événement, on rapportera ici, d'après M. Ch. Renard (1), les expressions de l'effort et de la puissance à fournir pour la propulsion des ballons allongés (y compris la nacelle et le filet).

Si l'on appelle :

D, le diamètre du ballon, en mètres ;
V, sa vitesse, en mètres par seconde ;
F, la résistance de l'air au mouvement longitudinal de l'appareil ;
P_u, la puissance utile de traction ;
P, la puissance sur l'axe de l'hélice ;

On aura :

$F = 0{,}01685\ D^2 V^2$ kilogrammes,
$P_u = 0{,}01685\ D^2 V^3$ kilogrammètres par seconde,
$P = 0{,}0326\ D^2 V^3$ — —

En appliquant, par exemple, cette dernière formule à un ballon de 10 mètres de diamètre, auquel on voudrait donner une vitesse propre de 10 mètres par seconde, on trouve, pour la valeur de la puissance à produire sur l'arbre de l'hélice :

$$P = 0{,}0326 \times \overline{10} \times \overline{10}^{m} = 3260 \text{ kgm. par seconde,}$$
$$= 43{,}5 \text{ chevaux-vapeur.}$$

Un tel ballon pourrait cuber 3140 mètres ; il se dirigerait

(1) *Sur les nouvelles expériences exécutées au moyen du ballon dirigeable « La France »*. Note de M. Ch. Renard. — *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 7 décembre 1885.

Digitized by Google

en air calme, et même dans une atmosphère modérément agitée.

Transmission et Distribution de l'Énergie par les Courants Secondaires. — Dans une distribution directe d'énergie électrique sur des surfaces étendues, l'élément le plus coûteux est la canalisation. L'amortissement et l'entretien des conducteurs surchargent les dépenses de l'exploitation.

Les *Transformateurs* permettent de tourner cette difficulté. On emploie des courants primaires de haute tension, alternatifs ou continus, parcourant des conducteurs longs et minces avec une perte d'énergie assez petite. En divers points du circuit, les courants primaires travaillent dans les transformateurs, où ils induisent des courants secondaires aux potentiels utilisables.

Les accumulateurs rendraient des services plus complets que les transformateurs dans la distribution de l'énergie électrique sur des réseaux étendus. Ils peuvent, en effet, être répartis dans les postes à desservir, comme les transformateurs, et y donner des courants à la tension voulue. Des avantages spéciaux résultent de leur emploi :

1° Ils établissent l'indépendance de la production et de la consommation; l'abonné n'a donc pas à subir les irrégularités ou les arrêts de l'usine productrice;

2° Par suite de cette indépendance, l'usine productrice peut travailler régulièrement, 20 heures sur 24, malgré les variations de la consommation. La puissance de l'usine

Digitized by Google

étant calculée d'après la somme d'énergie à produire dans une journée, les machines et la canalisation primaire sont utilisées sans cesse en pleine charge : d'où réduction de matériel, diminution des dépenses de premier établissement, d'amortissement et d'entretien.

Ainsi l'accumulateur, qui apporte la sécurité dans l'entreprise, n'est pas un auxiliaire onéreux ; les économies qu'il procure rachètent largement les frais qu'il occasionne. Mieux connu, il s'imposera comme le plus sûr et le plus complet des transformateurs, comme le meilleur agent de distribution de l'énergie électrique (1).

Translation ou Déplacement de l'Energie. — Les accumulateurs, auxiliaires précieux des transmissions par conducteurs, permettent d'effectuer le déplacement de l'énergie sans le secours d'une canalisation. Le procédé, qu'aucuns dédaignent parce qu'ils le trouvent trop simple, consiste à charger des batteries près de la force exploitée, et à les transporter, chargées, sur les lieux d'utilisation.

(1) Les *rendements propres* respectifs des transformateurs d'induction (transformateurs proprement dits), et des accumulateurs, sont :

Transformateurs à courants alternatifs ..... 0,94.
— à courants continus (selon les régimes de travail). 0,875 à 0,780.
Accumulateurs ..... 0,72.

Les transformateurs à courants alternatifs ont le rendement le plus élevé ; mais ils distribuent l'énergie sous une forme qui ne permet son utilisation que dans les applications calorifiques.

Les transformateurs à courants continus comportent une utilisation plus générale ; leur rendement se rapproche de celui des accumulateurs, dont ils n'ont pas tous les avantages.

Digitized by Google

Roulage de l'énergie. — C'est la translation opérée par voie de terre, sur voitures ou sur wagons. Ce moyen, en usage depuis plusieurs années, rendra de grands services quand il sera pratiqué logiquement, avec des accumulateurs légers.

La locomotion par accumulateurs nous donne le spectacle de l'énergie effectuant son propre roulage, avec un poids additionnel, qui pourrait consister en batteries chargées voyageant avec leur énergie disponible.

Flottage de l'énergie. — On appellerait ainsi le déplacement de l'énergie par voie d'eau. Le flottage est analogue au roulage. Il faut pourtant remarquer ceci : la propulsion sur eau, *à petite vitesse*, n'exige qu'une très faible dépense de travail (voir page 208) ; si les accumulateurs sont aptes à rouler leur propre énergie, ils peuvent la porter par eau, avec sacrifice d'une moindre fraction du travail embarqué.

Il est donc utile de signaler ce mode de translation de l'énergie, jusqu'à ce jour inusité.

Captage des forces naturelles. — Ce qui a été dit quant à l'utilité des accumulateurs pour le transport et la distribution des forces industrielles, s'applique surtout aux forces naturelles.

S'il s'agit d'une force hydraulique constante, l'exploitation directe n'en tire parti qu'aux heures de la consommation, soit 1500 heures (éclairage) à 3000 ou 3500 heures (emplois mécaniques). Avec les accumulateurs, la force peut être

Digitized by Google

captée presque sans interruption, c'est-à-dire pendant plus de 8 000 heures par année.

Quand la force exploitée est irrégulière, le procédé direct ne doit compter que sur la puissance minima; les accumulateurs permettent d'utiliser, régulièrement ou non, sa puissance moyenne.

Certaines forces intermittentes (vents, marées...) qu'on n'emploie guère, sont facilement exploitables par les accumulateurs.

Le captage des forces naturelles (énergies actuelles) par les batteries secondaires, doit se substituer peu à peu à l'exploitation de la houille (énergie fossile), qui fournit trop exclusivement la chaleur à nos foyers et la force à nos machines.

« Les houillères occupent une armée de 400 000 mineurs. « On peut les considérer comme de véritables champs de « bataille, car cent mille tonnes de houille coûtent en « moyenne la vie d'un ouvrier. » (E. Jouffret : *Introduction à la théorie de l'Énergie*, page 150).

Notre soleil, qui pourvoit à toutes les énergies de la nature, peut suffire aussi à tous les besoins artificiels de la civilisation.

« De la chaleur que cet astre darde dans toutes les « directions, la Terre, qui est pour lui un petit disque sous- « tendant un arc de 17 secondes (1), n'intercepte qu'une

(1) « Cet angle est 110 fois plus petit que celui sous lequel nous voyons la Lune, « et moitié de celui sous lequel nous apparaît la planète Vénus à ses époques de

Digitized by Google

« fraction égale à l'unité divisée par un nombre supérieur « à *deux milliards*. Cette parcelle, pourtant, équivaut à la « somme de chaleur qu'on obtiendrait en brûlant, *par jour*, « cinq cents millions de tonnes de houille, ce qui représente « environ deux mille fois la production *annuelle* de toutes « les houillères du globe. C'est cette parcelle qui fait toute « la vie de notre planète : les mouvements qui ont lieu dans « son atmosphère ou à sa surface, l'existence végétale et « animale, les luttes que nous livrons pour accroître notre « bien-être ou pour nous entre-détruire, etc., n'en sont « que des effets, des utilisations ou des abus.

« Bien peu nombreux en effet sont les cas où l'énergie a « une autre origine. On peut citer :

« — Les éruptions volcaniques et les tremblements de « terre, dus à la chaleur et à la pression centrales ;

« — Le mouvement des marées, dont l'énergie a sa « source dans la rotation diurne ; en sorte que, si l'on « arrivait à utiliser en grand, au moyen de turbines ou « autrement, la force motrice qui réside dans le flux et le « reflux, on verrait cette rotation se ralentir et le jour « s'allonger ; .... » (Jouffret, *loc. cit.* pp. 131 et 132).

C'est à tort qu'on s'inquiète de l'épuisement fatal des houillères ; elles seront abandonnées bien avant d'être épuisées.

« plus grand éclat. Il est égal à celui sous lequel nous verrions une bille de « billard (0m06) placée à 700 mètres de notre œil. »

Digitized by Google

« La seule chute du Niagara, où cent millions de tonnes « d'eau tombent par heure d'une hauteur de 47 mètres, « représente autant d'énergie que la houille qui se « consomme actuellement sur toute la surface de la « Terre. » (*Loc. cit.*, p. 151).

L'abandon des houillères, rendue possible par l'emploi de l'Accumulateur Voltaïque, amènera une révolution industrielle dont les conséquences sociales peuvent être déjà entrevues....

Sans insister sur ces considérations, que chacun peut méditer, l'auteur espère avoir montré combien est vaste, par ses conséquences, l'objet de ce petit *Traité*.

FIN

Digitized by Google

PILES ELECTRIQUES

ET

ACCUMULATEURS

RECHERCHES TECHNIQUES

Un volume in-8° raisin, avec 51 figures dans le texte.

PRÉFACE

Ce livre est la réunion des *Recherches Techniques* sur les piles primaires et secondaires, que j'ai récemment fait connaître dans diverses publications périodiques, notamment les *Comptes-Rendus* de l'Académie des sciences, les *Séances* de la Société française de Physique, *l'Électricien*, *La Nature*, *Le Génie civil*, *etc.*

Je me suis flatté de l'espoir que ce recueil serait bien accueilli, maintenant que l'attention des physiciens et des ingénieurs revient aux *piles électriques* longtemps délaissées, et aux *accumulateurs*, dont l'apparition sur la scène industrielle avait d'abord soulevé une opposition irréfléchie.

Les *piles primaires*, qu'aucuns croyaient destinées à disparaître devant les électromoteurs mécaniques ou thermiques, commencent à reprendre faveur. Les travaux qu'on réunit ici apportent quelques documents nouveaux à leur étude.

Une première *Note* donne les *forces électromotrices maxima et minima* d'une trentaine de combinaisons voltaïques composées de deux élec-

Digitized by Google

trodes et d'un seul liquide. Quelques-uns de ces couples, autrefois mesurés par d'autres physiciens, m'ont donné des *maxima* plus grands et des *minima* plus petits que ceux trouvés par mes devanciers : ce fait semble démontrer l'efficacité des dispositifs institués en vue d'obtenir des valeurs, sinon exactes, au moins très approchées des grandeurs à mesurer.

Le dispositif à *maxima* possède une constance relative ; j'ai proposé de l'employer comme *étalon de force électromotrice*.

L'attaque locale des zincs de pile, dans divers liquides, a fait l'objet d'expériences concluant à l'emploi des *alliages* zinc et mercure. Cette conclusion commence à recevoir le suffrage des praticiens.

Beaucoup de moyens, plus ou moins heureux, ont été employés ou proposés pour la séparation des électrolytes dans les appareils électrochimiques à deux liquides ; ces *cloisons poreuses* ont été passées en revue. Chemin faisant, on a décrit un certain nombre de piles intéressantes.

Les *forces électromotrices* attribuées aux *couples du genre Daniell*, ont été révisées sur vingt-deux combinaisons différentes. Ces mesures révèlent des écarts de 14 pour 100 dans la force électromotrice pour des différences chimiques qu'on pourrait croire peu importantes à première vue.

Combien de fois a-t-on accusé la *pile* d'être un électromoteur trop coûteux ? Il y a mieux à faire que de répéter ce lieu commun ; c'est de calculer et comparer méthodiquement le *prix de revient de l'énergie* livrée par les meilleures combinaisons voltaïques : tel est l'objet de la septième *note*. On a démontré que la pile peut, dans certaines conditions, fournir du travail à raison de 2 francs le cheval-heure (270 000 kilogrammètres). C'est le coût du travail fourni par les chevaux de trait, dans les meilleures conditions d'exploitation. L'obstacle principal à l'emploi des *piles* n'est donc pas dans le prix qu'elles font payer leurs services.

Digitized by Google

Cette étude et les suivantes comportent la connaissance des *équivalents électrochimiques*. On a dressé le *tableau* des poids intéressés par 1 *coulomb* et par 3 600 *coulombs* (1 ampère-heure), pour les corps ou composés chimiques usuels. Ces chiffres, utiles dans tous les calculs relatifs à l'électrochimie, épargneront aux électriciens des calculs fastidieux. On les a fait précéder d'un exposé succint des *définitions* et des *lois* relatives à l'analyse et à la synthèse électro-chimiques.

La dernière *Note* relative aux *piles primaires* est une évaluation de la *dépense de travail faite* par *les microphones* du réseau téléphonique de Paris. L'intérêt de cette étude n'est pas exclusivement spéculatif; les conclusions sont susceptibles d'application.

J'ai affecté de ne pas séparer l'étude des *piles primaires* des *recherches techniques* relatives aux *Accumulateurs Électriques*. Entre les uns et les autres, il n'y a qu'une différence d'ordre pratique. Il ne faut pas craindre de répéter cette proposition ancienne et connue, mais encore trop peu sentie : *les accumulateurs sont des piles*.

Mais toutes les *piles* ne sont pas des *accumulateurs*. Ceux-ci sont des cas particuliers de celles-là.

Considérés à ce point de vue, les *Accumulateurs* perdent tout-à-coup le caractère spécial, un peu mystérieux, qui a retardé leurs progrès en les dérobant longtemps aux recherches des techniciens.

En leur appliquant résolument les moyens d'investigation employés pour les autres *piles*, j'espère avoir apporté de la netteté à mes études sur *les Variations de la force électromotrice* dans les piles secondaires, sur *la Théorie chimique des accumulateurs* et les *conséquences pratiques* de cette théorie. Ces études sont précédées d'une revue des principaux *systèmes d'accumulateurs* anciens et nouveaux.

On n'a pas négligé les applications. *L'éclairage électrique par accumulateurs* est étudié sur l'installation du théâtre des Variétés ; cet éclairage a disparu, mais nous ne devons pas laisser perdre les enseignements

Digitized by Google

qu'il a fournis. *La Traction par accumulateurs* est l'objet d'un travail assez développé. Enfin, on a effleuré la question de *la Distribution de l'Énergie par les accumulateurs*, à propos du projet de Nantua.

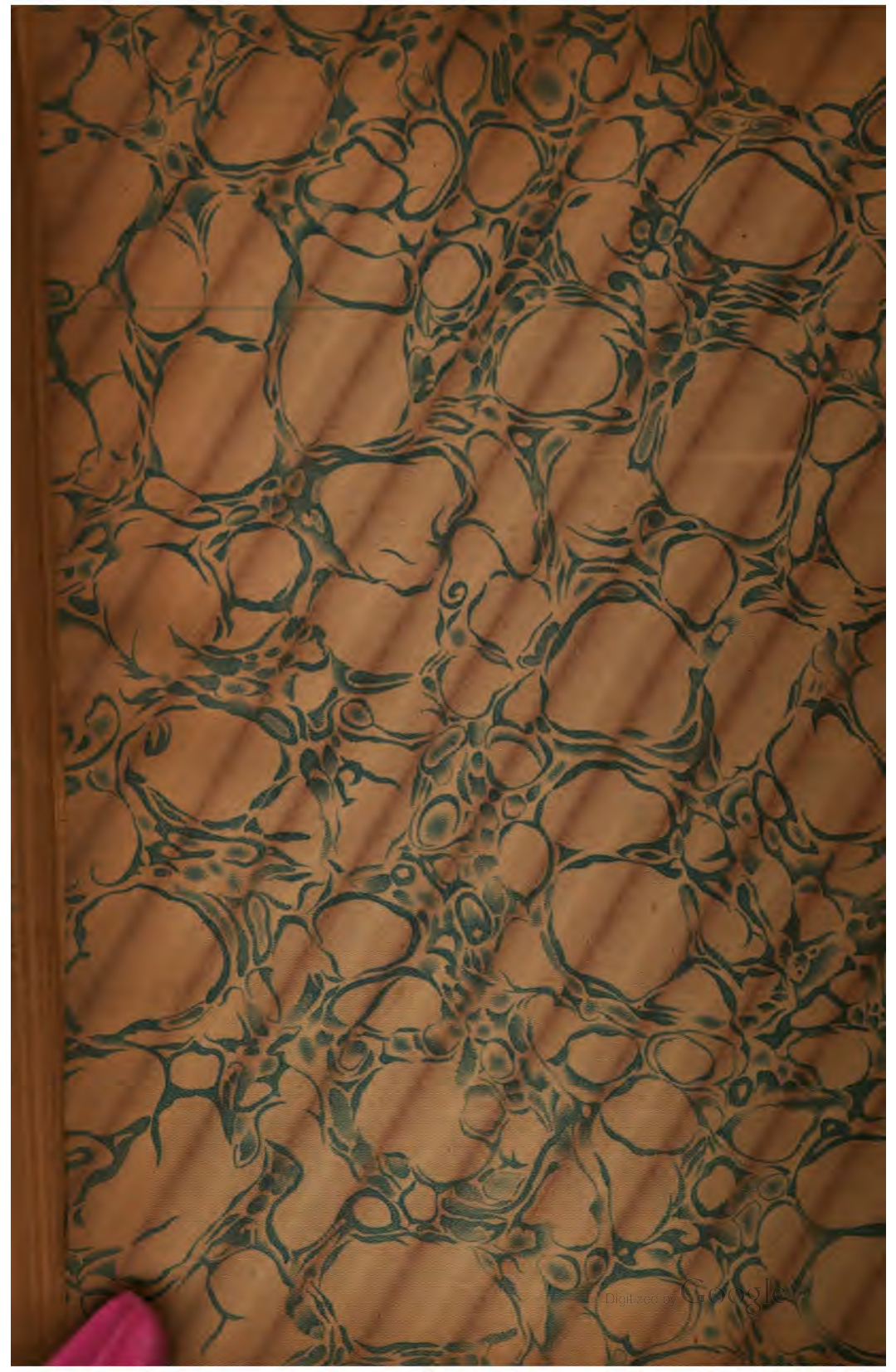
Rapprochées les unes des autres, dans un ordre convenable et reliées par une *table analytique*, ces *recherches* forment un ensemble auquel l'unité de vues donne une certaine cohésion.

E. R.

Charleville. — Typ. et Lith. F. DEVIN et Ce, rue de l'Arquebuse, 29.

Digitized by Google

Digitized by Google


Digitized by Google

This book should be returned to the Library on or before the last date stamped below.

A fine of five cents a day is incurred by retaining it beyond the specified time.

Please return promptly.

Digitized by Google

Eng 4068.88
Traite elementaire de l'accumula
Cabot Science 006440071
3 2044 091 940 478

Digitized by Google